弁　言

· Preface to Series of Chinese Version ·



这套丛书中收入的著作，是自文艺复兴时期现代科学诞生以来，经过足够长的历史检验的科学经典。为了区别于时下被广泛使用的"经典"一词，我们称之为"科学元典"。

我们这里所说的"经典"，不同于歌迷们所说的"经典"，也不同于表演艺术家们朗诵的"科学经典名篇"。受歌迷欢迎的流行歌曲属于"当代经典"，实际上是时尚的东西，其含义与我们所说的代表传统的经典恰恰相反。表演艺术家们朗诵的"科学经典名篇"多是表现科学家们的情感和生活态度的散文，甚至反映科学家生活的话剧台词，它们可能脍炙人口，是否属于人文领域里的经典姑且不论，但基本上没有科学内容。并非著名科学大师的一切言论或者是广为流传的作品都是科学经典。

这里所谓的科学元典，是指科学经典中最基本、最重要的著作，是在人类智识史和人类文明史上划时代的丰碑，是理性精神的载体，具有永恒的价值。

一

科学元典或者是一场深刻的科学革命的丰碑，或者是一个严密的科学体系的构架，或者是一个生机勃勃的科学领域的基石。它们既是昔日科学成就的创造性总结，又是未来科学探索的理性依托。

哥白尼的《天体运行论》是人类历史上最具革命性的震撼心灵的著作，它向统治西方思想千余年的地心说发出了挑战，动摇了"正统宗教"学说的天文学基础。伽利略《关于

托勒密与哥白尼两大世界体系的对话》以确凿的证据进一步论证了哥白尼学说，更直接地动摇了教会所庇护的托勒密学说。哈维的《心血运动论》以对人类躯体和心灵的双重关怀，满怀真挚的宗教情感，阐述了血液循环理论，推翻了同样统治西方思想千余年、被"正统宗教"所庇护的盖伦学说。笛卡儿的《几何》不仅创立了为后来诞生的微积分提供了工具的解析几何，而且折射出影响万世的思想方法论。牛顿的《自然哲学之数学原理》标志着17世纪科学革命的顶点，为后来的工业革命奠定了科学基础。分别以惠更斯的《光论》与牛顿的《光学》为代表的波动说与微粒说之间展开了长达200余年的论战。拉瓦锡在《化学基础论》中详尽论述了氧化理论，推翻了统治化学百余年之久的燃素理论，这一智识壮举被公认为历史上最自觉的科学革命。道尔顿的《化学哲学新体系》奠定了物质结构理论的基础，开创了科学中的新时代，使19世纪的化学家们有计划地向未知领域前进。傅立叶的《热的解析理论》以其对热传导问题的精湛处理，突破了牛顿《原理》所规定的理论力学范围，开创了数学物理学的崭新领域。达尔文《物种起源》中的进化论思想不仅在生物学发展到分子水平的今天仍然是科学家们阐释的对象，而且100多年来几乎在科学、社会和人文的所有领域都在施展它有形和无形的影响。《基因论》揭示了孟德尔式遗传性状传递机理的物质基础，把生命科学推进到基因水平。爱因斯坦的《狭义与广义相对论浅说》和薛定谔的《关于波动力学的四次演讲》分别阐述了物质世界在高速和微观领域的运动规律，完全改变了自牛顿以来的世界观。魏格纳的《海陆的起源》提出了大陆漂移的猜想，为当代地球科学提供了新的发展基点。维纳的《控制论》揭示了控制系统的反馈过程，普里戈金的《从存在到演化》发现了系统可能从原来无序向新的有序态转化的机制，二者的思想在今天的影响已经远远超越了自然科学领域，影响到经济学、社会学、政治学等领域。

科学元典的永恒魅力令后人特别是后来的思想家为之倾倒。欧几里得的《几何原本》以手抄本形式流传了1800余年，又以印刷本用各种文字出了1000版以上。阿基米德写了大量的科学著作，达·芬奇把他当做偶像崇拜，热切搜求他的手稿。伽利略以他的继承人自居。莱布尼兹则说，了解他的人对后代杰出人物的成就就不会那么赞赏了。为捍卫《天体运行论》中的学说，布鲁诺被教会处以火刑。伽利略因为其《关于托勒密与哥白尼两大世界体系的对话》一书，遭教会的终身监禁，备受折磨。伽利略说吉尔伯特的《论磁》一书伟大得令人嫉妒。拉普拉斯说，牛顿的《自然哲学之数学原理》揭示了宇宙的最伟大定律，它将永远成为深邃智慧的纪念碑。拉瓦锡在他的《化学基础论》出版后5年被法国革命法庭处死，传说拉格朗日悲愤地说，砍掉这颗头颅只要一瞬间，再长出这样的头颅一百年也不够。《化学哲学新体系》的作者道尔顿应邀访法，当他走进法国科学院会议厅时，院长和全体院士起立致敬，得到拿破仑未曾享有的殊荣。傅立叶在《热的解析理论》中阐述的强有力的数学工具深深影响了整个现代物理学，推动数学分析的发展达一个多世纪，麦克斯韦称赞该书是"一首美妙的诗"。当人们咒骂《物种起源》是"魔鬼的经典"、"禽兽的哲学"的时候，赫胥黎甘做"达尔文的斗犬"，挺身捍卫进化论，撰写了《进化论与伦理学》和《人类在自然界的位置》，阐发达尔文的学说。经过严复的译述，赫胥黎的著作成为维新领袖、辛亥精英、五四斗士改造中国的思想武器。爱因斯坦说法拉第在《电学实验研究》中论证的磁场和电场的思想是自牛顿以来物理学基础所经历的最深刻

变化。

在科学元典里，有讲述不完的传奇故事，有颠覆思想的心智波涛，有激动人心的理性思考，有万世不竭的精神甘泉。

二

按照科学计量学先驱普赖斯等人的研究，现代科学文献在多数时间里呈指数增长趋势。现代科学界，相当多的科学文献发表之后，并没有任何人引用。就是一时被引用过的科学文献，很多没过多久就被新的文献所淹没了。科学注重的是创造出新的实在知识。从这个意义上说，科学是向前看的。但是，我们也可以看到，这么多文献被淹没，也表明划时代的科学文献数量是很少的。大多数科学元典不被现代科学文献所引用，那是因为其中的知识早已成为科学中无须证明的常识了。即使这样，科学经典也会因为其中思想的恒久意义，而像人文领域里的经典一样，具有永恒的阅读价值。于是，科学经典就被一编再编、一印再印。

早期诺贝尔奖得主奥斯特瓦尔德编的物理学和化学经典丛书《精密自然科学经典》从1889年开始出版，后来以《奥斯特瓦尔德经典著作》为名一直在编辑出版，有资料说目前已经出版了250余卷。祖德霍夫编辑的《医学经典》丛书从1910年就开始陆续出版了。也是这一年，蒸馏器俱乐部编辑出版了20卷《蒸馏器俱乐部再版本》丛书，丛书中全是化学经典，这个版本甚至被化学家在20世纪的科学刊物上发表的论文所引用。一般把1789年拉瓦锡的化学革命当做现代化学诞生的标志，把1914年爆发的第一次世界大战称为化学家之战。奈特把反映这个时期化学的重大进展的文章编成一卷，把这个时期的其他9部总结性化学著作各编为一卷，辑为10卷《1789—1914年的化学发展》丛书，于1998年出版。像这样的某一科学领域的经典丛书还有很多很多。

科学领域里的经典，与人文领域里的经典一样，是经得起反复咀嚼的。两个领域里的经典一起，就可以勾勒出人类智识的发展轨迹。正因为如此，在发达国家出版的很多经典丛书中，就包含了这两个领域的重要著作。1924年起，沃尔科特开始主编一套包括人文与科学两个领域的原始文献丛书。这个计划先后得到了美国哲学协会、美国科学促进会、科学史学会、美国人类学协会、美国数学协会、美国数学学会以及美国天文学学会的支持。1925年，这套丛书中的《天文学原始文献》和《数学原始文献》出版，这两本书出版后的25年内市场情况一直很好。1950年，他把这套丛书中的科学经典部分发展成为《科学史原始文献》丛书出版。其中有《希腊科学原始文献》、《中世纪科学原始文献》和《20世纪(1900—1950年)科学原始文献》，文艺复兴至19世纪则按科学学科(天文学、数学、物理学、地质学、动物生物学以及化学诸卷)编辑出版。约翰逊、米利肯和威瑟斯庞三人主编的《大师杰作丛书》中，包括了小尼德勒编的3卷《科学大师杰作》，后者于1947年初版，后来多次重印。

在综合性的经典丛书中，影响最为广泛的当推哈钦斯和艾德勒1943年开始主持编译的《西方世界伟大著作丛书》。这套书耗资200万美元，于1952年完成。丛书根据独

创性、文献价值、历史地位和现存意义等标准，选择出 74 位西方历史文化巨人的 443 部作品，加上丛书导言和综合索引，辑为 54 卷，篇幅 2500 万单词，共 32000 页。丛书中收入不少科学著作。购买丛书的不仅有"大款"和学者，而且还有屠夫、面包师和烛台匠。迄 1965 年，丛书已重印 30 次左右，此后还多次重印，任何国家稍微像样的大学图书馆都将其列入必藏图书之列。这套丛书是 20 世纪上半叶在美国大学兴起而后扩展到全社会的经典著作研读运动的产物。这个时期，美国一些大学的寓所、校园和酒吧里都能听到学生讨论古典佳作的声音。有的大学要求学生必须深研 100 多部名著，甚至在教学中不得使用最新的实验设备而是借助历史上的科学大师所使用的方法和仪器复制品去再现划时代的著名实验。至 1940 年代末，美国举办古典名著学习班的城市达 300 个，学员约 50000 余众。

相比之下，国人眼中的经典，往往多指人文而少有科学。一部公元前 300 年左右古希腊人写就的《几何原本》，从 1592 年到 1605 年的 13 年间先后 3 次汉译而未果，经 17 世纪初和 1850 年代的两次努力才分别译刊出全书来。近几百年来移译的西学典籍中，成系统者甚多，但皆系人文领域。汉译科学著作，多为应景之需，所见典籍寥若晨星。借 1970 年代末举国欢庆"科学春天"到来之良机，有好尚者发出组译出版《自然科学世界名著丛书》的呼声，但最终结果却是好尚者抱憾而终。1990 年代初出版的《科学名著文库》，虽使科学元典的汉译初见系统，但以 10 卷之小的容量投放于偌大的中国读书界，与具有悠久文化传统的泱泱大国实不相称。

我们不得不问：一个民族只重视人文经典而忽视科学经典，何以自立于当代世界民族之林呢？

三

科学元典是科学进一步发展的灯塔和坐标。它们标识的重大突破，往往导致的是常规科学的快速发展。在常规科学时期，人们发现的多数现象和提出的多数理论，都要用科学元典中的思想来解释。而在常规科学中发现的旧范型中看似不能得到解释的现象，其重要性往往也要通过与科学元典中的思想的比较显示出来。

在常规科学时期，不仅有专注于狭窄领域常规研究的科学家，也有一些从事着常规研究但又关注着科学基础、科学思想以及科学划时代变化的科学家。随着科学发展中发现的新现象，这些科学家的头脑里自然而然地就会浮现历史上相应的划时代成就。他们会对科学元典中的相应思想，重新加以诠释，以期从中得出对新现象的说明，并有可能产生新的理念。百余年来，达尔文在《物种起源》中提出的思想，被不同的人解读出不同的信息。古脊椎动物学、古人类学、进化生物学、遗传学、动物行为学、社会生物学等领域的几乎所有重大发现，都要拿出来与《物种起源》中的思想进行比较和说明。玻尔在揭示氢光谱的结构时，提出的原子结构就类似于哥白尼等人的太阳系模型。现代量子力学揭示的微观物质的波粒二象性，就是对光的波粒二象性的拓展，而爱因斯坦揭示的光的波粒二象性就是在光的波动说和粒子说的基础上，针对光电效应，提出的全新理论。而正是

与光的波动说和粒子说二者的困难的比较,我们才可以看出光的波粒二象性说的意义。可以说,科学元典是时读时新的。

除了具体的科学思想之外,科学元典还以其方法学上的创造性而彪炳史册。这些方法学思想,永远值得后人学习和研究。当代研究人的创造性的诸多前沿领域,如认知心理学、科学哲学、人工智能、认知科学等等,都涉及到对科学大师的研究方法的研究。一些科学史学家以科学元典为基点,把触角延伸到科学家的信件、实验室记录、所属机构的档案等原始材料中去,揭示出许多新的历史现象。近二十多年兴起的机器发现,首先就是对科学史学家提供的材料,编制程序,在机器中重新做出历史上的伟大发现。借助于人工智能手段,人们已经在机器上重新发现了波义耳定律、开普勒行星运动第三定律,提出了燃素理论。萨伽德甚至用机器研究科学理论的竞争与接收,系统研究了拉瓦锡氧化理论、达尔文进化学说、魏格纳大陆漂移说、哥白尼日心说、牛顿力学、爱因斯坦相对论、量子论以及心理学中的行为主义和认知主义形成的革命过程和接收过程。

除了这些对于科学元典标识的重大科学成就中的创造力的研究之外,人们还曾经大规模地把这些成就的创造过程运用于基础教育之中。美国兴起的发现法教学,就是几十年前在这方面的尝试。近二十多年来,兴起了基础教育改革的全球浪潮,其目标就是提高学生的科学素养,改变片面灌输科学知识的状况。其中的一个重要举措,就是在教学中加强科学探究过程的理解和训练。因为,单就科学本身而言,它不仅外化为工艺、流程、技术及其产物等器物形态、直接表现为概念、定律和理论等知识形态,更深蕴于其特有的思想、观念和方法等精神形态之中。没有人怀疑,我们通过阅读今天的教科书就可以方便地学到科学元典著作中的科学知识,而且由于科学的进步,我们从现代教科书上所学的知识甚至比经典著作中的更完善。但是,教科书所提供的只是结晶状态的凝固知识,而科学本是历史的、创造的、流动的,在这历史、创造和流动过程之中,一些东西蒸发了,另一些东西积淀了,只有科学思想、科学观念和科学方法保持着永恒的活力。

然而,遗憾的是,我们的基础教育课本和不少科普读物中讲的许多科学史故事都是误讹相传的东西。比如,把血液循环的发现归于哈维,指责道尔顿提出二元化合物的元素原子数最简比是当时的错误,讲伽利略在比萨斜塔上做过落体实验,宣称牛顿提出了牛顿定律的诸数学表达式,等等。好像科学史就像网络上传播的八卦那样简单和耸人听闻。为避免这样的误讹,我们不妨读一读科学元典,看看历史上的伟人当时到底是如何思考的。

现在,我们的大学正处在席卷全球的通识教育浪潮之中。就我的理解,通识教育固然要对理工农医专业的学生开设一些人文社会科学的导论性课程,要对人文社会科学专业的学生开设一些理工农医的导论性课程,但是,我们也可以考虑适当跳出专与博、文与理的关系的思考路数,对所有专业的学生开设一些真正通而识之的综合性课程,或者倡导这样的阅读活动、讨论活动、交流活动甚至跨学科的研究活动,发掘文化遗产、分享古典智慧、继承高雅传统,把经典与前沿、传统与现代、创造与继承、现实与永恒等事关全民素质、民族命运和世界使命的问题联合起来进行思索。

我们面对不朽的理性群碑,也就是面对永恒的科学灵魂。在这些灵魂面前,我们不是要顶礼膜拜,而是要认真研习解读,读出历史的价值,读出时代的精神,把握科学的灵

魂。我们要不断吸取深蕴其中的科学精神、科学思想和科学方法，并使之成为推动我们前进的伟大精神力量。

需要说明的是，编辑科学元典丛书的计划，曾经得益于彭小华先生及李兵先生的支持。1990年代初，在科学史学界一些前辈学者和同辈朋友的帮助下，我主编了《科学名著文库》，由武汉出版社出版。十多年过去了，我更加意识到编辑和出版科学元典丛书的意义。现在，在北京大学出版社的支持下，我们得到原《科学名著文库》以及其他汉译科学元典译者的帮助和配合，编辑出《科学素养文库·科学元典丛书(第一辑)》，奉献给读者。这套丛书的前期组织工作，还得到了中国科学技术协会科普专项资助。当然，科学经典很多。我们不可能把所有科学经典毫无遗漏地都收进这套丛书中来。我们期待着，继第一辑之后，这套丛书还会有第二辑、第三辑……的出版。当然，这需要有更多的优秀译者加入我们的行列。

任定成
2005年8月6日
北京大学承泽园迪吉轩

《控制论》导读

胡作玄

（中国科学院数学与系统科学所）

· Chinese Version Introduction ·

无论自动机器，还是神经系统、生命系统，以至经济系统、社会系统，撇开各自的质态特点，都可以看做是一个自动控制系统。在这类系统中有专门的调节装置来控制系统的运转，维持自身的稳定和系统的目的功能。控制机构发出指令，作为控制信息传递到系统的各个部分（即控制对象）中去，由它们按指令执行之后再把执行的情况作为反馈信息输送回来，并作为决定下一步调整控制的依据。

ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΣ ΜΟΡΦΩΤΙΚΕΣ ΕΚΔΗΛΩΣΕΙΣ
ΣΤ' ΚΥΚΛΟΣ ΟΜΙΛΙΩΝ
«Διπλωματία:
Η ιστορία και
λειτουργία της έως
τη σύγχρονη εποχή»
6 Μαΐου - 10 Ιουνίου
κάθε Τρίτη
Αμφιθέατρο
Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών
Ώρα έναρξης: 19.30
ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ

无疑，我们已经进入信息时代，可谁是信息时代之父呢？2005年出版的康威（Flo Conway）和西格尔曼（Jim Siegelman）合著的一本维纳的传记中，第一句话就是"他是信息时代之父"（He is the father of the information Age）。这么一个短句用了两个定冠词，我无法把他们译成中文，只得把原文附上。当然我们不会对作者的意见有任何的误解，开创信息时代的只有这一位，尽管许多人并不认同，甚至于那些享受信息时代美好生活的年轻人，根本不知道维纳何许人也。你想知道吗？看看这本书的书名和副标题：书名是《信息时代的隐秘英雄》（Dark hero of the information age），副标题是"寻找控制论之父——诺伯特·维纳"（In search of Norbert Wiener, the father of cybernetics）。这本书的书名和副标题合在一起使维纳的身影凸现出来。在我们的心目中，的确有不少信息时代的英雄，从冯·诺伊曼，仙农到比尔·盖茨，唯独漏掉了这位深藏不露的隐秘英雄，也许正因为如此，我们才有必要查找他，探寻他，深入挖掘他的思想。他就是维纳——控制论之父，而这个称号，不像计算机之父，几乎是没人有异议的。维纳之所以被认为开辟了信息时代之路，也正是由于他这部经典著作《控制论》。

究竟什么是控制论，也是一个聚说纷纭，莫衷一是的问题。好在维纳在他的《控制论》给出一个副标题"动物和机器中控制与通信的科学"，表明了他的出发点。也就是从动物、人到机器如此不同的复杂对象中，抽取共同的概念并用一种全新的视角，通过全影的方法进行研究。这样一来，原来属于不同学科的问题，在一个新科学——控制论的名义下统一起来。从这个观点出发，控制论的对象是从自然、社会、生物、人、工程、技术等等对象中抽象出来的复杂系统。为了研究这些完全不同系统的共同特色，控制论提供了一般的方法，这种方法接近数学方法，但比数学方法更为广泛，特别是用计算机进行模拟和仿真，这显然比传统的数学方法与实验方法对复杂系统有着更为有效的作用，而且适用范围也大得多。可以说，控制论是一个包罗万象的学科群。

1974年，苏联出版两大卷《控制论百科全书》显示出控制论所涉及的多种多样的学科，同时，由此也可以看出控制论与我们现在所处的信息时代以及信息时代出现的诸多新兴学科的亲缘关系。

- 计算机科学
- 信息科学
- 通信理论
- 控制理论
- 人工智能理论
- 一般系统论
- 机器人学
- 神经科学与脑科学
- 认知科学
- 行为科学

◀维纳实验室

当然，这些还只是控制论的核心部分，它的应用范围几乎包括所有学科，其中与其他学科交叉形成的规范学科有生物控制论、工程控制论、经济控制论，等等。

在我们这个日益专门化、专业日趋狭窄的时代，能够建立这样庞大领域的人绝非一位普通的科学家，他必定是位百科全书式的人物。没有博大精深的学识，没有开拓创新的实力，根本谈不上能整合出这样一个庞大的领域，只有像维纳这样的天才，才能融会贯通数学、哲学、科学和工程这么多的知识。当然，这来自维纳的教育成长历程，他的无可遏制的好奇心与求知欲，这里我还要强调的是他的理论思维能力，尤其是他的数学能力。维纳第二本自传《我是一个数学家》显示出他以作为一位数学家为荣，这不仅仅在于他的数学研究水平很高，还在于他能通过数学理解世界，也能理解任何哪怕是极为困难的学科。所有开拓信息时代的先驱几乎都具有非凡的数学头脑，许多人本人就是第一流的大数学家，维纳和冯·诺伊曼就是典型，单是他们的数学业绩也足以使他们名垂千古。还得补充一句的是：这些20世纪的数学大师在数学领域之内横跨多个领域，在数学领域之外也是博学多识。冯·诺伊曼精通历史，而维纳则精通哲学。正是他们带领我们进入信息时代。

维纳的生平

维纳的一生可以从他的两本自传来界定：《昔日神童》(1953)，《我是一个数学家》(1956)，但是对他的后十年没有提到，这里我们把他的生平分三段叙述。

1. 昔日神童

读书早恐怕是神童最明显的特征，维纳的学习生涯也从这里开始。三岁半时维纳就会自己读书了，虽然还有困难，也像其他小孩一样爱带着图画的书，但他终究还是一本一本读了许多书，四五岁时他开始读科学读物，如《自然史》，以及讲述行星和光的书，这些是他科学的启蒙读物，正是这些读物使他产生广泛的兴趣。

后来成为数学家的维纳，数学的基础训练却完全是靠父亲利奥一手教出来的。维纳对父亲的数学水平非常佩服。到其他小孩上学的时候，他的读、写、算等早期训练早已完成。维纳在七八岁时，已经成了一个无所不读的孩子，父亲的五花八门、无所不包的藏书可以说充分刺激小维纳的好奇心和求知欲，对每一本到手的科学书，他都如饥似渴地阅读。

1901年秋天，父亲把他送到附近的皮博迪小学读书，但在小学没呆多久就退了学。从这时起，一直到将近9岁进中学，甚至进入中学以后，维纳的全部教育都是直接或间接由父亲指导的。维纳这近两年的教育，纯粹是这位天才的加强速成班。父亲对此制定严格的教育计划，其核心是数学和语言。数学由父亲教代数、几何、三角及解析几何，语言请一位家庭教师教德文及拉丁文。维纳的学习任务的确是完成了，不过，这种教育方式却留下了后遗症。由于读书过多，两眼疲乏，8岁时已经高度近视。他动作笨拙，不善交往，恐怕也是这种片面教育的结果。

1903年秋天，他被送到艾尔中学读初中三年级，下一年年初便跳到高中一年级。他

很感激艾尔中学时代的朋友们，他们使得维纳能在一个富有同情和谅解的环境中，度过自己成长的困难阶段。

在他进入大学之前，有两件事值得一提：一件事是他6岁时读过一篇文章，这曾在他幼小的心灵中激发起“设计仿生自动机的欲望”，我们感叹控制论的苗头出现在20世纪初的一个小孩子心中真是何其早也！另一件事是他在中学的一次讲演比赛。他写了自己的第一篇哲学论文，题目为“无知论”，以哲学来论证一切知识都是不完全的。实际上这问题是认识论的中心问题，他的哲学思维的确早熟，这恐怕也是他天才的一部分。

1906年9月，不到12岁的维纳进入塔夫茨学院，开始他的大学生活。进入塔夫茨学院而非与其近邻的哈佛学院，也是他父亲的主意。他父亲明智地认识到，哈佛的紧张的入学考试，以及随后对这神童的宣扬对这个神经质的孩子没什么好处。根据维纳的中学成绩表以及几项简单的考试（大部分是口试），他被录取进入塔夫茨学院。

在塔夫茨学院，维纳主修数学，他自己感到他的水平已超过大学一年级水平。于是一进校就选择了方程论这门课，但他感到困难。而其他数学课程大都是以培养工科学生为目标，对他来说在他脑子里一闪而过，并没有什么困难。如果说数学上他还算不上天才的话，他在工程方面的确是个奇才。物理课和化学课以及工程试验对他更有吸引力。他曾动手设计粉末检波器和静电变压器，这对只有12岁的维纳达到这样的水平的确是令人惊奇的。

由于维纳的父亲看到小维纳自学一些哲学，并且能流畅地使用一些哲学词汇，就鼓励他向这方面发展。在塔夫茨第二年，他选修几门哲学及心理学课程，对他产生影响最大的哲学家是17世纪唯理论者斯宾诺莎（Baruch Spinoza，1632—1677）和莱布尼兹，特别是后者。维纳认为莱布尼兹是最后一位百科全书式的博学的天才。实际上控制论的哲学思想也源自于他。

在塔夫茨学院的最后一年，维纳的兴趣又集中在生物学上，他选读金斯利（Kingsley）教授的“脊椎动物比较解剖学”这门课，他8岁就读过这位教授写的《自然史》，而对生物学产生兴趣。在学习理论方面，维纳并没有遇到问题，他最善于领会事物的分门别类，但是一到动手做实验，立即就显出这位神童的极大弱点。他的实验做得太快、太草率，更有甚者，有一次实验中因违反操作规程而把实验动物弄死了，他虽然没有受到惩罚，但负罪感始终伴随着他。最后在1909年春天，他还是在数学系毕了业，这时他还不满15岁。

维纳大学毕业后，坚持要上哈佛大学研究生院攻读动物学，他本人当时对生物学的兴趣比什么都大，他父亲勉强同意。他进入哈佛大学研究生院的目标是获取生物学博士学位。尽管他很博学、很聪明，可是这些品质对学生物学来说是远远不够的。他的实验工作糟得没法再糟，简直毫无希望。不过天真的维纳还真以为他“虽然有严重缺陷，但仍然可以对生物学作出一定贡献”，可是谁都看得出他不适合于这一行，除了他自己。有讽刺意味的是，维纳自己后来的控制论的确使生物学完全是一门观察和实验的科学得以些许的改变，从而给一些笨手笨脚但思维敏捷的人留一块研究的空间。

维纳在生物学上的挫折，最终促使他父亲再次采取新的行动。父亲建议他转学哲学，他再一次听从了父亲的意见，但后来又抱怨他父亲没有慎重考虑，干扰了他自己的决定。1910年夏天过后，他取得康奈尔大学赛智哲学院的奖学金。在康奈尔的一年中，他

选修各种课程，阅读大量原始文献，这一方面为后来跟罗素学哲学打下坚实的基础。另一方面，他学会古典时期英国的文风，有助于形成自己写作风格。康奈尔大学出版自己的哲学期刊，而研究生的任务之一就是把其他哲学期刊上的论文写成文摘，在该刊上发表。这种翻译工作无疑对维纳是一个极好的训练，他不仅熟悉了各语种的哲学词汇，又了解当时世界上流行的哲学思潮，因此对于这位未来的哲人科学家来说，只有哲学才是真正得到按部就班的比较严格训练的。

作为他未来的事业的数学并不是这样。在康奈尔学习期间，他想跟哈钦森(Hutchinson)教授学习复变函数论，仍然感到心有余而力不足，这再次暴露出在数学方面，他的才能并不怎么突出。一年过去了，他没有能够再次得到奖学金。听到这个消息之后，他父亲再次做出决定，要他转到哈佛大学哲学院学习。维纳原先指望，在哪里跌倒就在哪里爬起来，而父亲的决定，使这个本来就缺少自信的孩子更加缺乏自信，这类事情对维纳来说似乎是难以接受的，几乎把这个天才压垮了。他没有学会在这个人生阶段应该具备的自立的能力及寻找平衡的技巧，反觉得自己前途渺茫，只是听从命运的摆布而随波逐流。

维纳在哈佛的两年，总觉得失意而不快，而在他父亲和别人看来，却是成功的两年。他在1912年夏天取得硕士学位，到1913年夏天又得到哲学博士学位，这时，他不过18岁，也就是其他人刚考上大学的年纪。维纳在这两年中，受到了过去从来没有的最有价值的训练，特别是讨论班使各种专业的人讲出他们的方法及其哲学意义，无疑预示着维纳后来的跨学科研究及哲学方法论研究的模式。在这里他结识各种人物与各种思想，对于像维纳这种有着广博知识、开放心胸以及兼收并蓄态度的人，会有多么大的收获。许多伟大的思想也在讨论班上看到它的萌芽。

取得博士学位的关键当然是做博士论文并通过答辩。本来他想请罗伊斯(Josiah Royce, 1855—1916)做他的指导教师，做数理逻辑的论文，不过因为罗伊斯重病在身，只好由塔夫茨学院的卡尔・施米特(Karl Schmidt)教授来接替。他出一个在他看来颇为容易的题目，即比较施罗德(Emst Schröder, 1841—1902)的关系代数和罗素及怀特海的关系代数。施罗德是19世纪逻辑代数传统的最后传人，他们的目标就是实现莱布尼兹的目标。莱布尼兹的目标有两个：一是建立普遍的符号语言，这种语言的符号是表意的，每个符号表达一个概念或一种关系或一种操作，如同数学符号一样。二是建立思维的演算，通过演算逻辑的推理，可以用计算来代替。当遇到争论时，可以通过计算机判定谁对谁错。后一种理想的方案首先由布尔(George Boole, 1815—1864)在1847年开始实现的，它的指导思想是逻辑关系和某些运算非常相似，据此可以构造抽象代数系统即所谓布尔代数，于是形成所谓逻辑代数这一学科。其后经多人改进，最后施罗德将布尔代数构成一个演绎系统，特别是造成关系代数的系统。为此，维纳做了许多形式的工作，形成一篇合格的论文，最后顺利地通过考试。不过后来见到罗素以后，才意识到自己“几乎漏掉所有具有哲学意义的问题。”

维纳在哈佛的最后一年申请到了出国进修的奖学金。1913年夏天，维纳决定和父亲一起去欧洲。在欧洲，他主要听罗素的课，在罗素指导下工作。罗素开了两门课，一门是他的哲学课，即逻辑原子论，一门是阅读课，读的是他的《数学原理》。这一时期，他发表

了第一篇数学论文。

除了这些直接影响之外，罗素在两方面对维纳有着决定性的影响。一是罗素作为科学派大哲学家，真正能对当时物理学的大变革予以充分的肯定评价，并指出他们的哲学意义。他曾建议维纳去读爱因斯坦在 1905 年发表的三篇著名论文，一篇是狭义相对论的，一篇是光量子论的，这两篇都是直接推动物理学革命的划时代的论文。第三篇布朗运动在物理学上名声似乎没有前两者响亮，可是偏偏是这篇后来影响维纳数学的开创性工作。维纳承认自己对于物理，例如电子理论，理解起来很困难，这再次显示非科班出身的天才的一大缺陷。可是罗素对于后来成为数学家的维纳，却有着间接并且是决定性的影响。一开始罗素就从学习数理逻辑出发，希望他选修一些数学课，正是这些课才真正给他打下近代数学的基础。

对于按部就班的高等数学，维纳实际上并没有受过严格训练，幸好维纳碰到了罗素的同事，英国大数学家哈代，他是一个好教师，他能清楚而细致地把学生引导到最新领域，其中包括对维纳至关重要的一些概念，其中之一就是勒贝格积分。维纳本来要在剑桥呆一年，不过正好第二学期罗素已接受哈佛大学的邀请去美国访问，于是在罗素的建议下，维纳去格丁根大学学习。1914 年夏季学期他是在格丁根度过的，他听希尔伯特和朗道等大家的课，并从数学图书馆和数学讨论班中获益匪浅。他体会到，“数学不仅是在书房中学习的一门学科，而且是必须加以讨论，并把自己的生命投入其中的一门学科。”在格丁根，他结识了许多年轻的数学家。可以说，维纳在“博士后阶段”才掌握一些大学的基础数学。

1914 年夏天第一次世界大战打响，维纳在欧洲的学习难以为继，于是经颠簸的旅行后于 1915 年 3 月回到纽约。1915 年秋天，他被任命为哈佛大学哲学系的助教。由于教学任务繁重，他再也不像以前那样多产了，而且处处受到歧视。一位广博的天才往往总要被人讥讽为半瓶子醋的，这时期可以说是在任何一个专业领域他都前途渺茫。在这种情况下，又是他父亲再次替他做出决定，由哲学转向数学。他自己并不乐意，但对父亲的意志并不愿违抗。他开始定期参加哈佛数学会的活动，结识了当时哈佛的名流。

1916 年，哈佛组织一个军官训练团，称为哈佛军团。维纳出于某种考虑，参加这个军团，接受艰苦的军事训练，在大冬天穿着单薄的夏天军服，雪中跋涉并接受单兵训练及班组训练。春天继续在室外操练，并进行实弹射击。夏天他去普莱茨堡接受军训。最后，他没有学到什么技能，也没有被授予军官军衔，他再一次尝到了失败的苦果。1916 年秋天，他父亲又给他找一个缅因大学数学系讲师的职务，看来该稳定下来了，不过对他来讲，又是一场噩梦。他对付不了这些与他年纪相仿的桀骜不驯的学生。1917 年 4 月，美国参战之后，他申请离职并想去军事部门工作，但因视力不好多次未获准应征入伍，每到一个新地方，他的情况不但没有好转，反而每况愈下。

1917 年夏天，他还是文不文，武不武，闲来无事，去读数学。22 岁对于学数学已老大不小了，但他还没怎么上路，却像一些业余数学爱好者一样，试图去解某些数学大难题。他试着证四色定理、费马大定理和黎曼猜想，以他的有限知识，其结果可想而知。最后他又回到坎布里奇。由于战争，当时要想找一个长期的事做可以说根本不可能，更何况他这位没有“专业”的杂家了。大学不行，参军不要，维纳只好退而求其次，到工厂找点

工作。他父亲深知孩子的笨拙，在工程方面恐怕也不会有什么出息，于是又为他四处寻找工作了。

利奥以前曾为《美国百科全书》撰写过一两个条目，通过这种关系，他为维纳要来一份聘书，去当撰稿人。说老实话，对于这位百科全书式的天才，干这个事是最合适不过的了。维纳喜欢《美国百科全书》所在地奥尔巴尼，喜欢他的同事和上司，喜欢他的工作，也喜欢他自己所有的独立感。在这里他写了"美学"、"共相"等二十几个条目，登载在1918—1920年版的《美国百科全书》上。其中他写了一条叫"动物的化学感觉"，多少预示着后来的通信理论。

1919年春天，经过几年的波折之后，他对自己有了新的认识。对于失败，开始能够适应并表现得满不在乎，他认为："雇工的经历使我能得到独立，而这是其他方式无法取得的。我不仅自力更生，而且完全是在不求助父亲的方式自己谋生的。总之这是我远离家庭和没有父亲庇护的情况下谋生的。"他正成长起来，25岁的维纳虽然还没有安身立命的所在，但他心理状态已趋于成熟。

2. 数学家

维纳的第二本自传题目叫《我是一个数学家》，显然他以自己是一个数学家而自豪。不过从他前25年的经历来看，虽说是个天才，但很难说是个天才数学家。

1919年初，战争刚刚结束，美国新英格兰地区流行性感冒盛行。他的妹妹康斯坦斯的未婚夫，哈佛大学一位很有前途的数学家格林(Gabriel Narcus Green，1891—1919)在这场流感中不幸去世。康斯坦斯也攻读数学，格林的父母就把格林的数学书送给她留作纪念，其中大部分是在20世纪初开辟现代数学新方向的著作，如积分方程的著作，奥斯古德的《函数论讲义》，勒贝格的《积分论》，弗瑞歇的《抽象空间论》等。这些代表当时数学的前沿，比大学正在教的经典数学高出一大块。1919年夏天，失业的维纳恰巧读到这些书，一下子打开了通向数学世界的窗口，他认真攻读格林这些书以及勒贝格的《积分讲义》等书后，说"这是我平生第一次对现代数学有真正的了解。"实际上，无论是哈代，还是希尔伯特，还是哈佛的教授，都没有把他带到这个前沿，只是这次偶然的机会，才把他引向现代分析数学的彼岸。

1919年秋天，已经快25岁的维纳开始安顿下来。由于哈佛大学数学系奥斯古德教授的推荐，哈佛的近邻麻省理工学院数学系聘他当一年讲师。奥斯古德教授推荐维纳，仅仅因为他是爸爸利奥的好朋友。这样维纳在麻省理工学院一呆就是40年，从长期的观点看，与其说麻省理工学院收容了维纳，倒不如说维纳使麻省理工学院增光。

在麻省理工学院，维纳每周要教20多课时的初等微积分，不过那时他精力充沛，并不觉得是个沉重的负担。他的数学研究也刚刚走上正轨，而且处于由逻辑及基础领域转向分析领域的转折关头。1919年到1934年，维纳工作的中心是"硬"分析。这15年间，维纳可以当之无愧地被其他数学家认为是"务正业"，也就是说，像其他数学家那样集中精力，心无旁骛，踏踏实实写像样的数学论文，维纳毕竟是天才，他的分析工作使他享有国际声誉。而他的同事，即使在美国也最多算二三流。

但维纳这时刚刚对数学有一点了解，要做研究还得有人指点，而最好的指点就是出一个好题目。1919年夏天，维纳遇到莫尔的学生巴余特(Barnett，1894—1975)，巴余特

建议他研究“函数空间的积分问题”。维纳后来说“他的建议对我以后的科学生涯产生了重大的影响”，它不仅使维纳开辟了一个新方向，而且还引导维纳到更多、更重要而且富有成果的问题上。这个新方向就是为爱因斯坦的布朗运动理论建立了数学基础，从而使布朗运动成为通向随机过程理论的前沿。

1926 年，维纳与父亲的学生玛格丽特在费城结婚，随着两个女儿的出生，他更稳定地进入了家庭生活。他期待升职及改善经济状况，但 1927 年他还是助理教授。他在英国著名的科学杂志《自然》上看到伦敦和澳大利亚的教授招聘广告，于是在 1928 年申请澳大利亚墨尔本大学教授职位。尽管有当时世界第一流的数学家希尔伯特、哈代、卡拉提奥多瑞(Constantin Catatheorory，1873—1950)、维布仑等人的推荐信，但还是没有被聘用。1929 年，他在职的麻省理工学院把他升为副教授，时年已 35 岁。三年之后，他升为正教授。看一下他的著作目录，这三年他和往常一样，发表了十几篇“杂文”，像《数学与艺术》《回到莱布尼兹！》等等，可是他还写了三篇大论文。一篇是具有国际水平的瑞典的《数学学报》(Acta Mathematica)上登载的《广义调和分析》，一共 140 多页，它开创了一个新方向。一篇是登在美国最优秀的杂志《数学年刊》(Annals of Mathematics)上整整 100 页的大论文《陶贝尔型定理》，它开创了又一个新方向。第三篇论文只有十页，是同霍普夫(Eberhard Hopf，1902—1983)合作，用德文写的，发表在德国《柏林科学院院报》上，讨论的是一类奇异积分方程，它也开辟了一个新方向，这可以从后来专业术语的命名看出来，这类方程被称为维纳-霍普夫方程，与此对应的维纳-霍普夫技术应用到了多个学科领域。

1933 年维纳被选为美国国家科学院院士，这是科学家的至高荣誉。可是事情到了维纳那里又出了新花样，他因不满意科学院的官僚体制而于 1941 年向科学院院长提出辞呈。也是 1933 年，美国数学会把分析的最高奖博歇奖颁给他和莫尔斯(Marston Morse，1892—1977)，维纳得奖还是由于他在广义调和分析及陶贝尔型定理的工作，他的工作可以说达到当时硬分析的顶峰。1934 年维纳被选出做这个报告，他的题目是“复域的傅里叶分析”，专著也在同年出版。而到了 1940 年以后，维纳主要的研究完全转向了应用数学。

3. 控制论

从 1939 年 9 月第二次世界大战起，美国科学家已经在组织起来，维纳也不例外。1940 年，他被国防研究委员会任命为机械和电气计算工具领域研究的总顾问以及国防研究委员会的科学研究与发展局的统计研究小组运筹实验室的顾问，这个小组设在纽约哥伦比亚大学。美国数学会也成立备战委员会，维纳出任顾问。1940 年，他主要是参与计算工具的设计，年底提出一个备忘录。遗憾的是，他的许多先进思想并没能及时实现。显然，科研行政管理官员与科学家对科学研究的重要性的看法不同。

1940 年底，在麻省理工学院设立了考德威尔领导的研究小组，研究防空火力控制问题。维纳解决了这个纯军事问题。在这个过程中，他同毕罗格密切合作，取得了富有成效的结果。毕罗格原是国际商用机器公司(IBM)的工程师，从 1941 年初到麻省理工学院协助维纳工作。在 1942 年 12 月的给防空旅主要负责人威费尔的报告中，维纳称赞毕罗格在理论工作及数值计算方面的帮助是巨大的，特别是在装置设计尤其是发展电路技术

方面的贡献是不可或缺的。他后来也是维纳控制论运动的主要合作者。1946 年成为冯·诺伊曼在普林斯顿大学高等研究院研制计算机的总工程师。维纳与毕罗格工作远不限于此，特别他还解决了滤波器的设计问题，并把它变成统计力学问题。在这方面同仙农一起创立了通信和信息理论。

维纳和毕罗格合作研究防空火炮的工作持续了两年之久，其间他仍然参加罗森布吕特的讨论班。他们发现通信理论和神经生理学之间的密切关系，由此，三个人写出著名论文《行为，目的和目的性》，实际上是控制论思想的一个导引。

1943 年，维纳结识控制论另外两位先驱麦卡洛克、皮兹。同年，维纳把皮兹请到麻省理工学院，同他一起研究，他们在 1943 年到 1948 年的合作，对于维纳的思想发展起着重要作用。他在《控制论》中也谈到麦卡洛克与皮兹在 1943 年的经典工作"神经活动中内在思想的逻辑演算"。这在计算机和智能方面是开创性的。

继 1942 年在纽约召开的"关于神经系统中中枢抑制问题"会议宣告他们的合作之后，1943 年冬天在普林斯顿召开了迈向控制论的会议，不同学科的人形成了一个控制论运动。在二次大战战火正酣，从原子弹到计算机各种迫在眉睫的研究大力进行的时候，科学和哲学却酝酿着一次大突破。也正在这时，维纳清醒地意识到战后自动化社会的途径，他的控制论思想已经成熟了。

在战争期间维纳搞的几项工作，恰恰也是他控制论的四个来源：计算机设计、防空火炮自动控制装置的理论、通信与信息理论和神经生理学理论。

计算机设计 在计算机历史上，维纳常常是被忽略的人物。早在他访问北平期间，他同布什就有着许多信件往来，讨论计算机问题。而在当时，布什是制造计算机的电机工程师，1927 年起，他和哈岑合作制造微分分析器，这正是最早的模拟计算机。但模拟计算机在普遍性、速度及精确度三方面都有局限性。因此维纳认识到要克服这些困难，模拟计算机要数字化，这是解决问题的关键。他也明确地认识到，必须使每个基本运算过程的精度提高，才能不因为基本运算过程大量重复而导致误差积累，使得结果的精确度完全丧失。为此他提出了下列建议：

① 在计算机中心部分，加法和乘法装置应当是数字式的，如同通常的加法机一样，而不像布什微分分析机那样。

② 开关装置的元件应当用电子管，而不用齿轮或机械元件来做，以便保证更快速的动作。

③ 加法和乘法采用二进制，比起采用十进制来，在装置上大概会更为经济些。

④ 全部运算步骤要在机器上自动进行，从把数据放进机器的时候起到最后把结果拿出来为止，中间应该没有人的干预，所需的一切逻辑判断都必须由机器自身作出。

⑤ 机器中要包含用来储藏数据的装置，这个装置要迅速地把数据记录下来，并且把数据牢固地保存住，直到清除掉为止。读出数据要迅速，而且又要能够立刻用来储藏新的材料。

维纳虽然没有在计算机的研制方面显身手，但是他的计算机的思想却成了控制论的最早来源之一。

防空火炮自动控制装置的理论 当时，两个重要问题摆在面前：一是寻找某种方法

能够比较准确地预测飞机未来的位置；二是要设计一个火炮自动控制装置，使得发现敌机、预测、瞄准和发射能连成一气，并协调地完成。

维纳的这些成果在1942年12月终于完成，而且写成一份报告。由于封面是黄皮，而且数学艰深，工程师看了莫名其妙，被戏称为“黄祸”。它在美国军事研究和一般的民用设备中得到广泛的应用，长期以来保密，未公开发行，一直到1949年这本《黄祸》才以《平稳时间序列的外推，内插及光滑化及其在工程上的应用》的书名出版。

通信与信息理论 首要的问题就是要尽可能滤掉噪音，还原消息的本来面目，这就是所谓滤波器。维纳在《黄祸》一书中，同时也研究这个问题，用的是维纳关于预测的想法。

一般认为，信息论的创始人是仙农，他给出了信息的定量量度。但仙农自己说：“光荣应归于维纳教授，他关于平稳序列的滤波和预测问题的漂亮解决，在这个领域里，对我的思想有重大影响。

与仙农的离散观点不同，维纳是从连续观点来定义信息量的。他的理论来源于滤波器的设计，他的观点同冯·诺伊曼一样，把一个系统的信息量看成其组织化程度的度量，而一系统的熵，则是无组织程度的度量。这样他得到与仙农定义等价的信息量，只不过仙农的求和变成了维纳的积分。

神经生理学 维纳在同毕格罗合作研究高射炮手协调行动时，得出一个重要结论，就是随意运动（或自主运动）的重要因素就是控制工程师的所谓反馈作用。当我们期望按某个方式运动时，期望的运动方式和实际完成的运动之间的差异当做新的输入来调节这个运动，使之更接近期望的运动。例如要去捡一支铅笔，我们动员身上一组肌肉实现这一动作，为了不断完成这个动作，必须将我们与铅笔之间的差距随时报告大脑，然后通过脊髓传达到运动神经缩小这个差距，而当反馈不足时，就无法完成这个捡铅笔的动作。例如由中枢神经系统梅毒病导致的运动性共济失调病人就有这种情况。维纳和毕格罗估计还有另外一种病态，即反馈过度而引起震颤。他们请教罗森布吕特，果然有这种情形。病人因小脑受伤，在如捡铅笔的随意动作时超过了目的物，然后发生一种不能控制的摆动，这种病称为目的震颤。

这样他们对中枢神经系统的活动得到一个整体的概念，它不再是过去认为的那样由感官接受输人又传给肌肉运动中的中介器官，而是大脑指挥肌肉运动后再通过感官传入中枢神经系统的闭路过程，也就是形成反馈过程。

维纳的《控制论》在1948年出版。当时是在法国与美国同时出版，而以法文版为主。英文版有许多错误，在1961年第二版时做了更正。从第二版的序言中，可以看出维纳的心路历程。

在第二次世界大战出现的学科群中，维纳的控制论和仙农的信息论有着坚实的数学和物理理论基础。因此，它们有足够的发展空间。然而，把一个理论泛化成为许多分支的基础则会有许多哲学上和技术上的困难。不过，维纳还是这样做了。另一方面，维纳最先表现出对未来自动化社会中人的关心。1950年他出版《人有人的用处》对于控制论的普及起着重要作用。

第二次世界大战之后，科学登上了前台。科学家也分成鹰派和鸽派。许多著名人士

反对战争,反对核武器,反对军备竞赛,维纳就是其中的一员。而有些流亡者,特别是匈牙利的一些犹太人如氢弹之父特勒和计算机之父冯·诺伊曼,他们是不同程度的鹰派。亥姆斯的书就以此对维纳与冯·诺伊曼进行对比。

战后,维纳对控制论的研究使他疏远了数学界,尽管他仍然从事数学研究,特别是非线性滤波理论,这些研究于1958年结集出版,名为《随机理论的非线性滤波》。然而,他仍然受到方方面面的尊敬。美国最高的科学荣誉,由总统颁发的科学奖章,第一届在1964年颁发,他是五位获奖者中的一位。

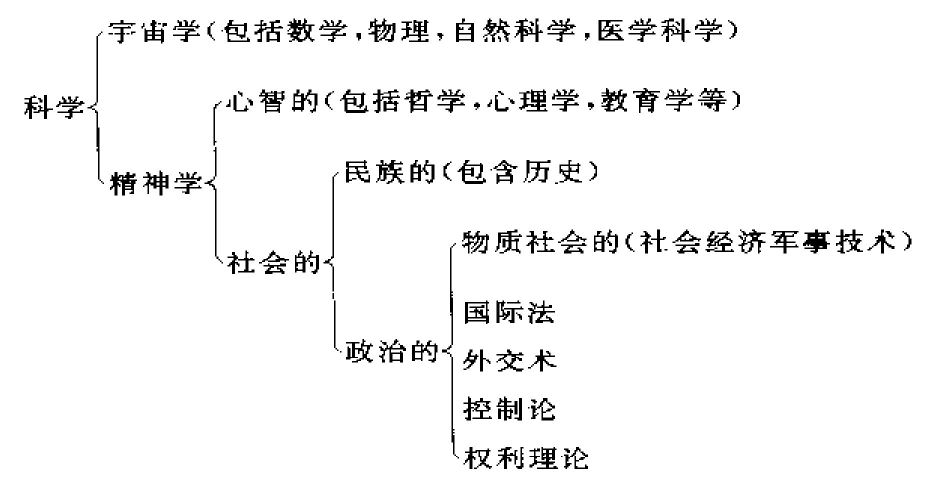
维纳晚年到世界各地访问。1960年曾访问苏联,1964年3月14日在瑞典访问期间心脏病突发,在斯德哥尔摩去世。

控制论简介

维纳为他的新领域选择一个新词——cybernetics,遗憾的是中文译名"控制论"对于中国读者造成了混乱。因为control theory这个特殊的数学分支就不得不译成控制理论以示区别。这样,原来cybernetics的内容及其广泛的含义用控制论一词就很难充分地反映出来了。

维纳使用的"控制论"来自希腊文kybernetics,原文为舵手、掌舵者,而指的是动物和机械中的通信与控制理论。

维纳后来才知道物理学家安培(Andre-Marie Ampere,1775—1836)早已用过这个词。众所周知,安培为鼎鼎大名的物理学家,他的电磁理论对电动力学的发展有着决定性的作用。不过很少有人知道,他还是位科学哲学家。在19世纪30年代,科学从自然哲学中刚刚解放出来,出现了实证主义思潮,这可以孔德(Auguste Comte,1798—1857)六大卷《实证哲学教程》(1830—1842)的出版为其代表。无论是孔德还是安培,都关心科学的分类,更确切地说,学科分类问题。因为在他们看来,科学与自然并不相同。一句话,科学只是人类认识,自然分类,以及自然不能代替的科学分类与科学史。安培晚年曾经写了一本著作《论科学哲学或人类全部知识的自然分类的分析论述》,分成两部分,在他去世后分卷出版(1838,1843)。他的分类大致如下:



他说他"所谓的控制论(cybernetique)来源于 κυβερυμτκμ(拉丁化为 kybernetics)最早狭义语是操纵船的技艺,最后发展成广义语义一般统治的技艺(希腊文也有此义)",这里统治的原文是 govern,这词在英国早已使用,特别是瓦特(James Watt,1736—1819)在 1784 年申请离心调节器专利也用的是 governor,但是安培似乎没有觉察到下面两点:

① 在政治领域之外还存在调节过程;

② 调节过程的关键要素是信息反馈。

当然,在安培那个时代这是可以理解的,因为那时候连"能量"的概念都没有,更不用说信息的概念了。更为明显的是,安培的分类表中虽然列有军事技艺或技术(他用的是 art 一词)及外交术(diplomatics),却没有工程(engineering)一词,这的确显示了他的局限性。实际上,蒸汽机的运转主要靠的是这个离心调节器来调节,这恐怕也是工程控制的关键所在。当时工业规模太小,恐怕还谈不上控制调解了,因为安培活着的时候火车还是一个新生事物。

维纳在写书之时,最早并没有选择 cybernetics 这个词。他当时更多地把这一领域看成是消息的理论,因此他认为最好的书名是用表示传递消息的信使的希腊文,但是唯一的希腊字是 angclos,翻译成英文就变成了天使(angel),也就是上帝的信使。他不愿意用这个词,这次才选上了 kybernetics,而且他认为拉丁字 governor 一词是从这个希腊词转译而来。他选用这词是为了纪念麦克斯韦在 1868 年发表的关于调速器的论文,论文中第一次提到了反馈机制。在用这个词的时候,俨然与他的初衷并不完全符合。另外,对 cybernetics 这个词的词源,他似乎也没有深入地探讨。而在《控制论》出版之后,才有不少历史的研究。

在现存的典籍中,最早出现 cybernetics 一词的是柏拉图(Plato,427B. C--347B. C)。在他现存的 35 篇对话中,公认有 23 篇出自他本人。在 10 篇早期作品中,有一篇《高尔吉亚》(*Gorgias*)。高尔吉亚约是公元前 483 年到公元前 375 年的希腊哲人,属于智者派。智者派,一译辩士派或诡辩派,他们主要是传授辩论术、语法、修辞术的人。他们生活在公元前 5 世纪,是柏拉图哲学思想来源的一个方面。柏拉图的对话中,有好几篇如《智者》、《普罗泰哥拉》、《高尔吉亚》就是针对他们的。由于他们的职业关系,他们更实用主义一些,重视修辞术、辩论术等实务,而对哲学持怀疑态度。当然这与柏拉图的观点大相径庭。在《高尔吉亚》中,柏拉图用 cybernetics 的意思就是航行技术和修辞技术。在这两种活动中,目的都是"控制",而技术的关键问题都是"信息反馈"。在航行中要有海浪对船的冲击,在辩论中要看听众的鼓掌、喝彩,不过这也不能说柏拉图就是控制论的先驱,因为他并没有说过消息的传出传入的闭路是航行与修辞的共有特征。不管怎么说,cybernetics及其衍生词是个老词,在荷马史诗及希腊先哲的著作中常用到。从具体的驾船以及驾车(柏拉图在《泰阿热篇》)一直到隐喻意义上的引导控制与统治。这样看来控制论的先驱不少,他们强调了其不同方面。在研究其历史过程中,许多名不见经传的人及著作也被挖掘出来。一位罗马尼亚的军医奥多伯莱亚(Stefan Odobleja)1938 年曾写过一本书《协调论心理学》(*Psychologie Consonantiste*),力图把心理学建立在协调概念的基础上,而这些协调靠不断反馈来保持。他用"可回归性"这词来表示反馈,他强调反馈

或闭回路的重要性，这是他独创之处。不过他不了解工程上的反馈，而且把反馈耦合解释为能量传递过程中而不是信息过程，使他的贡献大打折扣。

因此只有到维纳《控制论》这书出版以后，控制论一词才把过去不同的要素联系在一起，并且用哲学而不是专门技术的观点来概括，从而使一门新领域正式诞生：

——操纵和控制的技术（瓦特）

——控制，管理，统治的技术（安培）

——反馈回路（奥多伯莱亚）

——消息，信息（维纳和仙农）。

正是维纳把互不相关领域的要素统一起来上升到一个新高度。不仅如此，他还明确提出控制论的四个原则：

① 普遍性原则。任何自治系统都存在相类似的控制模式，普遍的机械化及自动化观点。

② 智能性原则。认识到不仅在人类社会而且在其他生物群体乃至无生命物体世界中，仍有信息及通信问题。

③ 非决定性原则。大宇宙、小宇宙的不完全的秩序产生出目的论及自由。

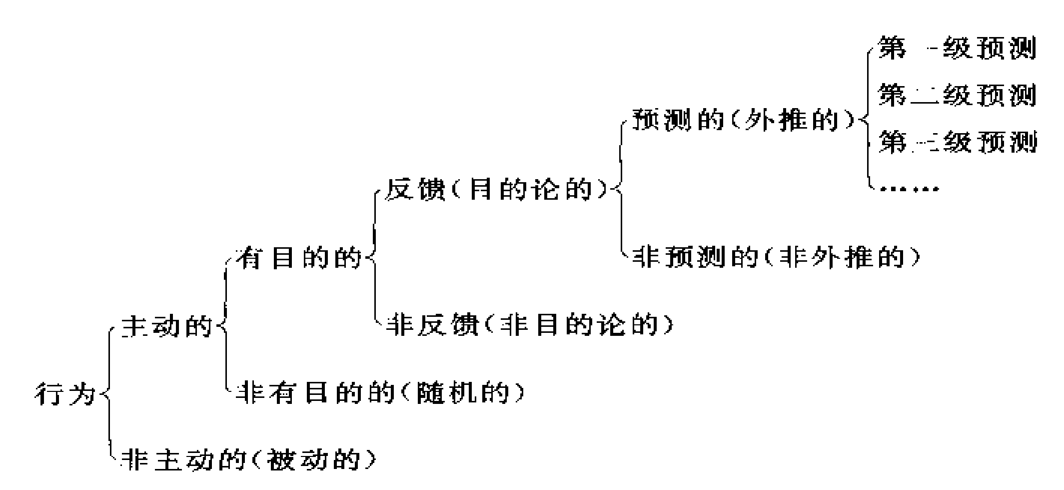
④ 黑箱方法。对于控制系统，不管其组成如何，均可通过黑箱方法进行研究。

同控制论的概念一样，这些原则也有或长或短的历史。换句话说，在整个文明史中，特别是近代文明史中，控制论的思想都或多或少，或明或暗地表现出来，只有维纳才能以大哲的知识的广博和思想的深刻把它们纳入一个蓬勃发展的领域。

《行为，目的和目的论》一文可以说是控制论的一个纲，这篇论文目的有两个：一是强调目的概念的重要性，一是定义行为主义的研究方法，实际上这就是所谓黑箱方法。

维纳等人把行为主义方法是作为功能主义方法的对立面来提出的。功能主义方法主要研究一个对象的内在结构或内在组织，研究其种种属性，而对象与环境之关系则处于次要地位。而行为主义的方法恰巧相反，主要强调对象与环境之间的关系，而不考虑其内在结构与组织究竟如何，以及它们是如何完成一系列任务的。由此可见，它们一个着眼于内在性质，一个着眼于外在变化，着眼点是根本不同的，而行为主义的方法也是与传统研究自然对象方法是很不一样的。

这里我们需要更确切讲一下这种不同寻常的方法。实际上我们研究一个对象和它与环境的关系，首先要把对象从环境中分离出来，也就是要明确什么是对象，什么是它的环境。对象与环境之间有两种作用：一种是输入，一种是输出。输入是环境以某种方式使对象变化，而输出则是对象以某种方式使环境发生某种变化。行为主义方法的研究重点就是研究对象的各种可能的输出，特别是这种输出与输入的种种关系。而所谓“行为”就是我们的对象相对于它的环境做出的任何变化。这种变化或者是因某种输入而引起的，因此一个对象可以从外部探知的任何改变都可以称之为“行为”。这篇论文的主要篇幅用来对“行为”进行分类，它大致可以概括在下面的表中：



除此之外，还可以有基于其他标准的分类，如线性与非线性，连续与离散，按行为的自由度来分类，等等。

从方法论上来，维纳把两类迥然不同的对象——机器与有机体——放在同一概念体系下来考虑，这是他在思想上的最重要的变革。“目前，对于这两类对象所用的研究方法是类似的，它们是否应该永远相同，要看是否有一个或一个以上本质上不同的，独一无二的特征出现在这一类而不出现在另一类之中。这类质的区别迄今尚未发现。”不过，这只是说，从行为主义的分析中找不到区别，而从结构功能主义分析中，机器与有机体显然大相径庭。近半个世纪，我们对有机体的结构显然已经知道得细致入微，不过，还是不能彻底驳倒维纳的主张：存在能学习的机器，自繁殖的机器，等等。

虽然维纳在 1948 年才出版他的名著《控制论》，可是消息、噪声、反馈、通信、信息、控制、稳态以及目的论等概念早已在这位杰出思想家的头脑中成熟并统一起来，直到最后终于完成了“控制论”（cybernetics）这个点睛之笔。

由于汉语翻译的原因，我们常常把控制论与大约同时出现的一个技术科学领域——控制理论（control theory）混淆起来。控制理论来源于比较具体而实际的问题，从蒸汽机的自动调节，温度的自动控制到导弹的自动制导等，在这些问题的基础上建立起物理和数学模型，进一步发展成为现代控制理论。其中许多问题，如防空火炮的平滑、滤波预测问题，维纳也研究过，但这些只不过是他控制论的思想来源之一。

与控制理论相比，控制论更是一门跨学科的学科群。实际上，与其说控制论是一门学科，倒不如说是一种科学的哲学理论或从一种新的角度来观察世界的系统观点和方法。从某种意义上讲，它与经典物理学的机械决定论是完全对立的，但是这种对立也不同于物理学内部的一些对立面，如量子力学，统计力学甚至现在流行的混沌理论。

毋庸置疑，现代物理、化学以及它们促成的技术极大地影响了我们的生产、生活和思维方式，但是，尽管经过许多人的努力，生命科学和心理科学还是难以纳入物理学和化学的框架之中。从结构上来讲，我们的确已到达生物的分子层次——核酸，蛋白质及其组成部分，可是我们还不能理解“生命是什么”，“智能是什么”。我们虽然可以合成多肽、多核苷酸甚至简单的蛋白质和核酸，可是我们还不能合成一个活细胞，也不能“设计一个脑”，至少眼下还不能造一个“智能机器人”。

维纳正是从这些问题出发来创立控制论的，他深刻地认识到，但用物理和化学的概

念来阐释生命现象及心理现象是不够的，他需要一套全新的概念，这就是信息、通信、控制和反馈。

对于生物体或有机体，维纳打了一个比喻：有机体是消息，生命体与混乱、瓦解、死亡相对立，正如消息同噪声相对立一样。对于有机体，机械论的观点是把它们一步一步分解到最后，把它们每个局部搞清楚，有机体无非就是局部的总合。但是控制论的观点则力求回答整体问题，即揭示其模式。有机体越成为真正的有机体，它的组织水平也越不断增加，因此它成为熵不断增加，混乱不断增加，差别不断消失这个总潮流的过程，这就称为稳态。

以人体来说，作为一个活的有机体，我们不断进行新陈代谢，组织器官都在不断的变化，换句话说。构成我们躯体的物质并不是不变的，不变的只是模式，这才是生命的本质。

模式就是消息，它也可以作为消息来传递，这一点已经充分被后来的生物学所证实。在维纳所处的时代，还指处于科学的思辨阶段，而现在则有更多的证据。历史上人们对于遗传的本质认识不清，总把精子和卵子看成小的胚胎。到摩尔根（Thomas Hunt Morgan，1866—1945）时代，他则认为是化合物的传递。一直到 1953 年“DNA 的双螺旋结构”出现以后，才明确由亲代传递给子代的信息，而信息是在基因上编码，由不同的核苷酸来体现，好像由 4 个字母写成的大书。果蝇的全部密码已经写出来了，现在世界上正全力以赴解开人的这些密码。第一步工作只是得出几十卷“百科全书”的电报密码，下一步工作还要把它解读出来，这就是语义学问题。从某种意义上来说，一个有机体全部信息全在这个密码本上记录着。人的一生无非是这个密码按照一定的规则表达出来而已，看来维纳的控制论的确抓住了生物学研究的大方向。生物体的各种过程差不多都是为了达到稳态的调节与控制过程，这在维纳的《控制论》中有充分的论述。

从本质上讲，控制论就是通信的理论，因此，维纳控制论的第二个来源是通信理论就不足为奇了。通信问题中包含理论问题和技术问题，由于通信无非是传送消息，而传送消息一是要准，二是要快，而二者往往是鱼与熊掌不可兼得，因此通信理论自然就围绕这两个问题开展的。

通信中准确或者不失真当然是头等重要的大事，但是消息在传送过程中不断有噪音干扰，使原来发送的信号失真，因此首要的问题就是要尽可能滤掉噪音，还消息的本来面目，这就是所谓滤波问题。维纳在解决这个问题的过程中运用了统计方法，从而导致信息量的统计理论的产生。

维纳控制论思想的另外两个来源是神经生理学和电子计算机。现在很少人知道，维纳也是电子计算机的先驱之一。从这些研究中，他深刻地理解输入、输出和反馈的概念，这些构成了控制论的基本概念。

控制论的四个来源很早就被许多科学家分别研究过，而只有维纳最后将它们概括成为一个思想体系。他的哲学基础则是目的论，而这在科学界的人看来纯粹是异端。

在专家之中，这位有着百科全书的知识以及博大精深的思想家常常得不到应有的理解和承认，但有趣的是，他的一些观点颇有预见性：

① 维纳在 50 年前，首先提出“自动化”的概念。现代产业自动化已经随着电子计算

机的普及有相当程度的实现，可是在当时第一代计算机才刚刚问世，其功能也很原始，应用领域极为有限。大多数国家，特别是发展中国家还远远没有解决工业化、机械化、电气化问题。这些还都是建立在“物质”与“能”的概念基础上。这时维纳已经清楚预见到建立在“信息”“通信”“控制”“反馈”等概念和技术上的“自动化”，显然远远超出了当时人们的认识水平。而这50年的发展，则证实了维纳的先见之明。

② 维纳控制论开创了研究生命科学、心理科学乃至社会科学的新思维，建立了诸如生物控制论、脑控制论、经济控制论等新领域，取得一系列成就。

③ 从20世纪50--60年代，维纳进一步预见，“后控制论”时期的科学和技术课题，其中有些课题最近才成为热门。1960年维纳访问苏联时，对于控制论面临的重要问题，他提出“首先是研究自组织系统，非线性系统以及同‘生命是什么’有关的那些问题。”，并提到这三者是一回事。维纳作为一位大数学家对于线性系统有许多贡献，而且清醒认识到非线性系统的重要性以及技术的困难。维纳本人也进行了许多研究，其中之一就是他在1938年首先发表以“混沌”(chaos)为题的论文，虽然他的混沌与现在的概念还不太一样，但他多少把混沌作为科研课题提到日程上来。

④ 维纳的最终目标是实现所谓“智能机”问题，虽说现在许多领域和技术均贴以“智能”的标签，但现有的机器同最简单的“智能机”仍有一道鸿沟。维纳指出，智能的首要问题是“学习”，而这是现在机器还无法办到而且许多科学家或哲学家认为根本无法办到的。维纳持乐观的态度，他指出“真正惊人的，活跃的生命和学习现象仅在有机体达到一定复杂性的临界度时才开始实现，虽然这种复杂性也许可以由不太困难的纯粹机械手段来取得，然而复杂性迫使这些手段自身受到极大的限制”。现在的手段已同当时不可同日而语，而更重要的是，他预示了“复杂性理论”从80年代起已成为一门新科学。

控制论的传播和影响

维纳的《控制论》出版之后，迅速出现一个传播热潮，这首先表现在西方各国出现有关控制论的出版物在1948年到1970年大致按指数增长的。主要的普及性书籍包括维纳自己的《人有人的用处》(1950)以及英国学者阿什比(Ashby)《控制论导论》(1956)等。而更为重要的是，控制论的思想和方法向各个学科领域渗透，产生出一系列冠以控制论之名的交叉学科。

首先，支持各学科交流的麦歇基金会从1944年起召开十次会议，1948年前后各有五次，参加会议的学者遍及许多学术领域，不仅有神经科学、脑科学、生态学、生理学、医学神经病学、心理学、电子工程、地球物理学，而且有社会科学、语言学、人类学、社会心理学、文学批评等。其中不少是各领域的著名专家。通过他们的交流和传播，形成了一些独具特色的研究方向，特别是生物控制论、经济控制论、社会控制论等。

其次，以控制论为核心形成了不同于原先自然科学体系(物理学、化学、天文学、地学、生物学等)的全新科学领域，它们同控制论一样，具有综合哲学、数学、具体科学和工程的特点，而且具有强烈的数学色彩，可以称之为广义数学或大数学。这些领域实际上

推动信息社会的建立与发展，特别也是诞生于1948年的信息论。另一个方向是控制理论，维纳也是这个理论的先驱之一，称之为广义数学或大数学。

最为重要的是，控制论对于当时在冷战和军备竞赛条件下，控制理论对制导武器的发展有直接的推动作用。特别是1960年以卡尔曼(Rudalf Kalman, 1930-)为首的数学家，完全突破经典控制理论，建立现代控制理论。他提出状态空间、能控性、可观测性、卡尔曼滤波等全新概念，逐步形成系统辨识，最优控制条件领域，为控制理论走向非线性、随机系统的控制打下基础。

控制论也推动人工智能和机器人学的建立及发展。

冷战时期诞生与发展的控制论，在苏联、东欧的传播也颇具戏剧性。苏联是个政治挂帅，意识形态控制极为严酷的国家。到1948年时，斯大林的哲学不仅全面控制哲学、社会科学、人文科学、文学艺术领域，而且迅速侵入到数学与自然科学领域，其代表就是把孟德尔-摩尔根的遗传学说成是“反动的”、“唯心主义的”、“形而上学的”、“资产阶级的”的李森科。正在这时，维纳的控制论诞生并传到苏联，立即遭到攻击，这从一些文章的标题就可以看出，如“什么控制论——一种美国的伪科学”“现代奴隶主的科学”。1954年出版的《简明哲学辞典》第四版(有中译本)列入“控制论”一条，称控制论是一种反动的伪科学，“一种现代形式的机械论”“控制论鲜明地表现出资产阶级世界观的一个基本特征——毫无人性，力图把劳动人民变成机械的附属品，变成生产工具和战争工具”。平心而论，维纳在《控制论》所标榜的柏格森和莱布尼兹以及目的论观点和人机理论的哲学倾向是一目了然的。

但是，冷战时期与美国斗争还要靠科学与技术，特别是与武器、控制和计算机有关的高技术。空洞的哲学批判毕竟不能代表军方的实力。1955年三位顶尖的科学家开始扭转这种风气，开始肯定控制论的积极作用。不久，控制论在苏联成为一大热门。其表现在1958年，维纳的《控制论》和《人有人的用处》的俄译本出版，以及连续出版物《控制论问题》开始出版。1959年，苏联科学院主席团决定成立控制论学术委员会，下有数学、计算机等8个分会，1967年增至15个分会，并协调达500个研究所。

1961年，控制论进一步受到官方支持，提出了“控制论为共产主义服务”的口号，并且正式写入苏共党纲。

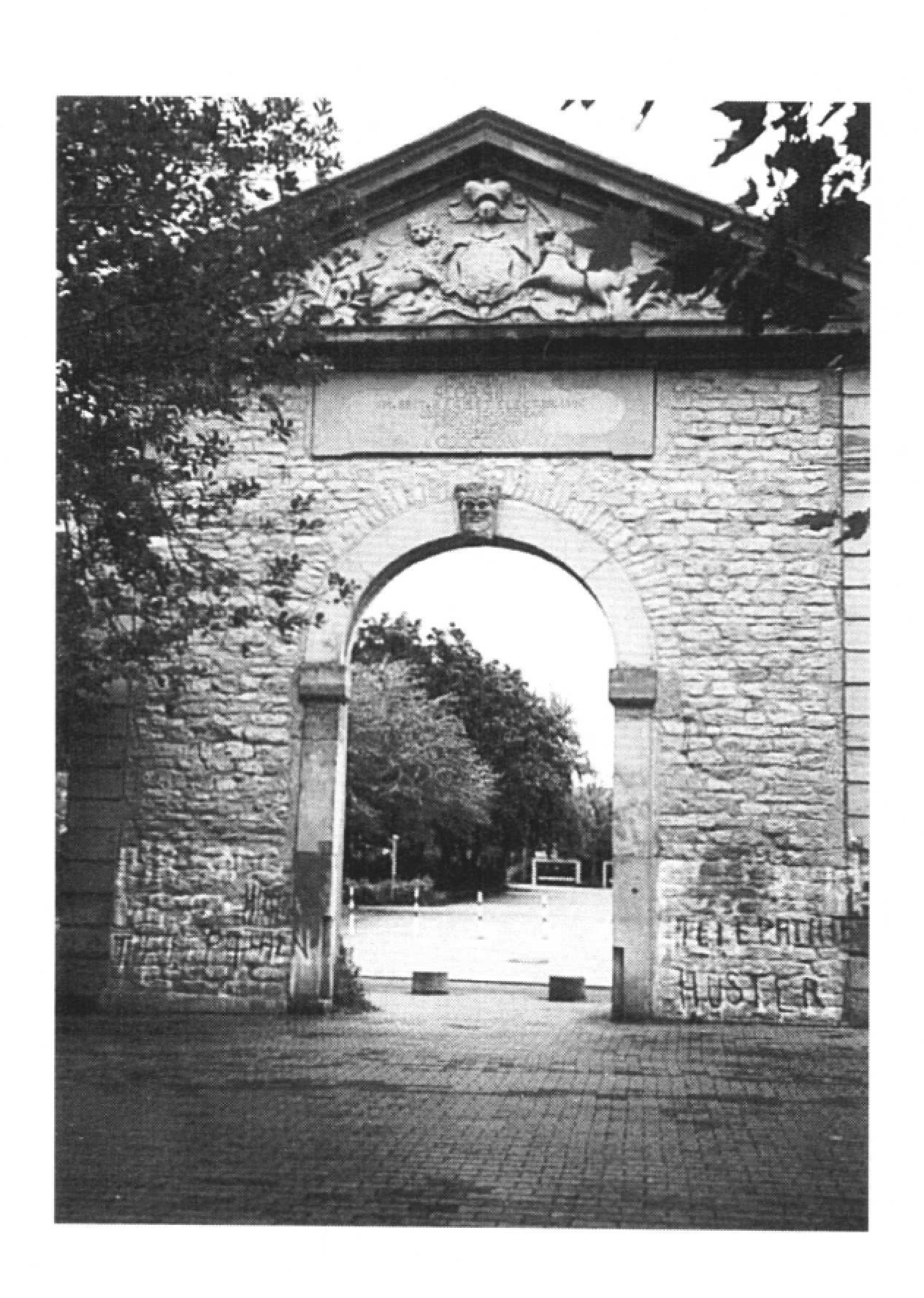
苏联的控制论热潮一直持续到20世纪80年代初，其高潮是1974年编著的两大卷《控制论百科全书》出版，这在全世界也是独一无二的。控制论在苏联的传播对数学和技术方面取得重大的成功，但在其他方面并不尽如人意。生物控制论虽未能取得实质的进展，却歪打正着地把伪科学大师李森科赶下台。在控制论的影响下，经济控制论与数理经济学也得到蓬勃发展，不过由于它的设想威胁到中央集权和计划经济，而不能实行。

显然控制论只是带有普遍性的科学哲学思考，运用到复杂系统上也有极多的技术性困难，不能用来包打天下。苏联从一个极端到另一个极端使得控制论开始降温，按照一个领域的本来面目来发展。

70年代末，控制论在西方开始衰落。但他的智慧及预见并没有消失，而是成为信息社会的有机组成部分。控制论可涉及的各个学科领域独立地发展成为较小的专门的分支，控制论成为它们共同的基础。

正是在这个时期，以计算机和互联网为技术基础的信息社会开始崛起，并逐步扩散到全球各个角落。这时，控制论似乎被人遗忘，但有意思的是，控制论的词汇却得到普及。以 Cyber 为字头的新词日益增长，而其含义无一例外地都同信息时代的两大标志——计算机和网络有关，如 Cyberspace，Cyberspeak；Cyberpunk，Cybersex 等不下百余个。

控制论至今已发展成为庞大的学科群，其中每个学科都运用控制论的共同思想和方法，并沿着各自的路线发展，这些都可在维纳的《控制论》中初见端倪。至于控制论本身也有一些发展，例如 20 世纪 70 年代中期二阶控制论的提出，以及散布在一般系统论和信息论，控制理论等独立学科中的理论。以控制论为名的专业期刊，现有十余种，它们都在传播控制论思想中起重大作用。维纳和他的《控制论》仍是后人取之不尽的思想源泉。



《控制论》中译本和它的译者"郝季仁"

龚育之

· Cybernetics' Chinese Edition and Its Translator 'Hao Jiren' ·



逻辑、学习以及一切精神活动，作为一幅完美、封闭的图景一直不能被人理解，而只能作为人类使自己同其环境相一致的一种过程才能被人们理解。因此，重要的是为掌握知识而进行战斗。

——维纳



出版社准备出版一套有长远价值的学术著作丛书，把维纳的《控制论》(Cybernetics)一书列入其中，要求译者写个后记。我作为尚存的两位译者之一，很乐意写几句话，把当时翻译这本书的由来和经历，向今天的读者作个简单的介绍，既是为学术界提供一点学术史料，也是对已经去世的另两位译者表示一点纪念之情。

我们几个人着手翻译维纳这本名著，还是1956年的事情。

1956年这一年，在我们人民共和国的历史上，在我国科学工作的历史上，在我们许多人个人的历史上，是很值得怀恋的一年。“向科学进军”！“百花齐放、百家争鸣”！科学界的精神振奋起来了，科学界的思想活跃起来了。

这一年的1月周恩来总理在党中央召开的知识分子问题会议上作报告，阐述了“现代科学技术正在一日千里地突飞猛进”的逼人形势，特别讲了原子能的利用和“由于电子学和其他科学的进步而产生的电子自动控制机器，已经可以开始有条件地代替一部分特定的脑力劳动，就像其他机器代替体力劳动一样。”结论是：“这些最新的成就，使人类面临着一个新的科学技术和工业革命的前夕。这个革命，正如布尔加宁同志所说过的，‘就它的意义来说，远远超过蒸汽机和电的出现而产生的工业革命’。”布尔加宁是当时苏联的部长会议主席。

由此可见，当时在苏联，在中国，都在饶有兴趣地讨论用电子自动控制机器代替一部分脑力劳动的新的工业革命的问题。这样的兴趣和讨论，不能不使人注意到最初提出这方面见解(从机器作为人手的延长发展到作为人脑的延长，来看第一次工业革命发展到第二次工业革命)的N.维纳和他创立的Cybernetics，不能不使人对Cybernetics重新作出客观的评价。

说重新评价，就是因为以前有过评价。过去的评价不正确，所以需要重新评价。

苏联过去对Cybernetics的评价，是根本否定的评价。其代表就是1953年第5期《哲学问题》杂志发表的题为《Cybernetics为谁服务》的文章，署名是“唯物主义者”。1954年苏联两位哲学权威主编的《简明哲学辞典》，收有Cybernetics这个条目。这篇文章和这个条目对Cybernetics的判决词是：“一种反动的伪科学”，在哲学上是“人是机器”的机械论的现代变种，在政治上是为帝国主义服务的思想武器。

大家知道，从1948年李森科在斯大林和联共中央支持下发动批判摩尔根遗传学的运动开始，苏联在自然科学各个部门对许多学说都进行了粗暴而无理的政治批判和哲学批判，对Cybernetics的批判，仅是其中之一。苏联自然科学领域的这些批判，当时中国大都当做“先进的”东西翻译介绍过来了，并且在中国进行了学习，紧接着组织了或多或少的批判。不过，“唯物主义者”的这篇文章却没有翻译介绍过来，因而中国没有进行对Cybernetics的批判。现在有些文章常说当时中国跟着苏联也批判过Cybernetics，这个情况是没有的。这不是因为当时介绍苏联科学的中国人，在这个问题上有什么觉悟和不同的见解。纯粹是因为当时没有注意到。当然，也不能说苏联对Cybernetics的批判完全没有介绍到中国来，那本《简明哲学辞典》是出了中译本的，中译本根据原书条目的阐

◀哈佛大学校园里绿树掩映着一幢幢典雅的红砖楼。

释，把 Cybernetics 译为“大脑机械论”。不过夹在那么一本辞典中的一个小条目，不但中国科学界没有注意到，中国哲学界也没有注意到。

中国注意到 Cybernetics，还是受苏联的影响，在苏联对 Cybernetics 重新讨论和评价以后。1954 年 11 月哲学家和数学史家柯尔曼教授在苏共中央社会科学院作了一个题为《什么是 Cybernetics?》的报告，在《哲学问题》1955 年第 4 期发表了。同一期《哲学问题》还发表了数学家索波列夫院士的文章《Cybernetics 的若干基本特征》。这是苏联重新讨论 Cybernetics 的开始。

苏联科学界的这个动向引起了中国的注意。1955 年 11 月、12 月《学习译丛》(它是中宣部主办的一个月刊)相继发表关于这个动向的报道和胡平、景松译出的柯尔曼的那篇文章:《什么是 Cybernetics?》。因为译者和《学习译丛》编辑部的同志不是学自然科学的，就要在中宣部科学处工作的我为他们校订译文。开初他们还是按《简明哲学辞典》的译法，把 Cybernetics 译为“大脑机械论”。这是受过去错误评价而形成的错误译法，当然不应该沿用。该怎么译呢？我们几个人商量，觉得应该按 Cybernetics 这个词的希腊字源和这门科学的现实内涵来译，就商定译为“控制论”。同期《科学通报》译出索波列夫的文章，也统一用“控制论”这个新译法。由此这个译法传播开来，后来有人建议译为“控制学”，这个译法可能更好，但是“控制论”的译法既已传开，用惯，也就不便更改了。

1956 年 1 月知识分子问题会议报告的起草，其中的有关用语，无疑反映了上述的有关讨论和中国对苏联讨论的介绍和关注。

1956 年 5 月，中共中央宣传部长陆定一代表中共中央向科学界和文艺界作报告，阐述党的“百花齐放、百家争鸣”方针，特别说到自然科学是没有阶级性的；给自然科学学说贴阶级标签，例如说什么“米丘林的学说是社会主义的”、“孟德尔-摩尔根的遗传学是资本主义的”之类，就是错误的，我们切勿相信。陆定一这些话当然是针对苏联过去在自然科学领域进行粗暴批判和我们学习苏联也曾进行过许多粗暴批判这种情况而说的。中宣部科学处在处长于光远的主持下，按百家争鸣方针认真组织和推动了对遗传学问题的重新评价(1956 年青岛遗传学会议)和对其他一些遭到过粗暴批判的学说的重新评价。也就是在这个时候，科学处的三位同志，罗劲柏、侯德彭和我，还有在中宣部国际处工作的陈步，一共四个人，着手翻译维纳的《控制论》。

按我们原来的设想，是准备把翻译的过程当做学习和研究的过程，每译出一章译稿，就在我们几个人中间传观、学习、讨论，不但讨论译文的是否妥当，而且讨论其中的科学内容，还准备吸收几个对这个问题感兴趣的同志一起参加。实际上就是想搞成一个“控制论研究班”。我们的分工是，我译此书的长篇导言，他们三人分译和合校正文的各章。想搞这么一个研究班，就有点仿效维纳在导言中所介绍的他们那个酝酿出控制论思想的研究班的意思。这篇导言的中译文，在 1957 年第 6 期《学习译丛》上发表了。

然而，正是 1957 年 6 月掀起的那场风暴，把我们这个计划打破了。侯德彭、陈步两位同志被错划为“右派分子”。正文各章，虽已多数译出，但一章一章讨论的原议，没有法子实行了。几个月以后，候陈两位在等待处理下放之中。我们不甘心这本科学名著的翻译工作就此半途而废。他们三人继续完成了原来承担的翻译任务，相互校订了译稿，由罗劲柏出面，把这部书稿交给科学出版社了。当时规定，被划分“右派”的人不能用真名

出版著作。我和罗又不同意只由我们两人署名。这样，就编造了一个名字——“郝季仁”。“郝季仁”者，好几人也。

这本书的出版，已经是1961年的事。1962年又根据原书的1961年第二版，补充了新的两章，出了中译本的第二版。新版的补译，是罗劲柏负责。1985年，这个译本又第三次印刷。这时，侯陈两位的“右派”问题当然都已平反。但是，“郝季仁”这个名字，是一段历史的产物。历史的产物就让它留在历史上。我们都没有动议改署译者的姓名。

现在，新华出版社准备把这个中译本收入新的丛书。罗劲柏同志已于1985年逝世，陈步同志也于1992年逝世了。我应新华出版社之请来写这篇后记，引起对那一段往事和故友的回忆。罗和我是清华大学同学，他学物理，我学化学，1952年从大学毕业一起分配到中宣部科学处，共事多年，1973年又一起从被砸烂的中宣部“阎王殿”重新分配到国务院科教组，继续共事。粉碎“四人帮”后，虽然不在同一个单位了，但许多时候仍然有机会合作，比如，十二大的文件，中央关于经济体制改革的决定，中央关于教育体制改革的决定，我们都是一起参与一些具体文字工作的。没有想到，就在教育文件出来后不久，罗就发现了胃癌，住进我家附近的北大医院，我常在下班后遛进病房去探望，看到他辗转病床的痛苦，心里很是难受。罗在他周围的同志中，是公认的老实人，即心地善良、埋头苦干的人。他党性坚强，一直遵照组织安排在党的领导机关工作，又是书生本色，一直尽可能挤时间从事一些科学研究和著述。罗去世后，我们老科学处的几位同志搜集他的论文，编成集子《科学・人才・经济增长》，由广西科学技术出版社出版。侯德彭同志是1956年从北京大学物理系毕业来到中宣部科学处的，下放劳动后分到广西大学物理系工作，改正后当过广西大学校长，自治区党委和政府的负责干部，除了别的成绩外，在科学哲学方面还出过几本译著。陈步同志比我们都大，新中国成立前在中央大学哲学系毕业。1956年哲学研究所成立自然辩证法研究组时，于光远兼任组长，我兼做学术秘书，后来改由陈步兼做并决定把他调过去，还没有到任，就出了那场麻烦。下放劳动后分到商务印书馆工作，1978年在商务出版了他译的维纳的《人有人的用处》。这是维纳《控制论》的姊妹篇，译这本书的念头也是起于1956年，了却这桩心愿是22年之后了。

我们耽误了多少时间！我们需要为扎扎实实的学术建设抓紧多做工作。

1996年5月18日于万寿塔下

中译本第二版前言

· Preface of the Second Chinese Edition ·



本书中译本初版是根据原书初版翻译的。1961年原书再版，订正了初版的一些错误，增加了两章新的内容。现在，趁中译本第二版的机会，译者根据原书再版，对中译本也做了订正，翻译了它新增加的东西。

关于本书的内容，我们在初版的“译者序”中曾作了介绍。“译者序”还对作者的思想观点作了分析批判。从原书再版的情况看，我们认为“译者序”中所作的介绍和分析仍然是合适的。至于原书再版中新增加的内容，维纳在他的再版序言中已作了介绍。因此，关于原书的再版，译者没有什么新的话要说。

译　者

1962年10月

译者序

·Translator's Words·



关于原子弹，最重要的事情并不是一场特定的战争在我方无严重伤亡的情况下结束，而是我们现在面临着一个新的世界和我们今后的生活要遇到的新可能性。就以往的战争而言，我感到最重要的事实是，虽然对参战各方造成了毁灭性的破坏，但它们基本上是局部战争。一个国家和一种文明可能灭绝了，但是那种邪恶的破坏过程迄今为止一直是局部的，新的种族和民族仍可以接过别的种族和民族放下的火炬。

——维纳



诺伯特·维纳是控制论的创始人之一，他就是通过本书奠定控制论这一新兴科学部门的基础的。自1948年本书出版以来，书中所阐明的一些有关控制论的基本科学思想，一直在这门学科的发展中起着重要作用，书中提出的不少研究方向，也为以后的研究者大大加以发展。本书是研究控制论的重要的、基本的文献之一。

第二次世界大战前后，通信技术和自动控制技术都得到了迅速的发展。在这些技术的各自领域都积累了丰富的经验，分别提出了一些理论。但是，抓住一切通信和控制系统所共同具有的特点，站在一个更概括的理论高度，综合以上各个领域的经验和理论，并且把这些系统的控制机制和现代生物学所发现的生物机体中某些控制机制加以类比，形成控制论这样一门独立的专门的学科，则首先是维纳的功绩。

通信和控制系统的共同特点在于都包含一个信息变换的过程，一般说来，即包含一个信息的接收、存取和加工的过程。但是，一个通信系统一般总不会只重复传送某种信息，它们总是适应人们通信的需要传送着各种不同思想内容的信息。一个自动控制系统，也不像一部只是不断重复某种单调的动作的普通机器，它需要根据周围环境的变化，自动调整自己的运动，也可以说它必须具有一定的灵活性和适应性。由此可见，通信和控制系统所接收的信息带有某种随机的性质，也就是本书中经常提到的具有某种统计分布。因此，通信和控制系统本身的结构也就必须适应它所接收和加工的信息的这种统计性质。维纳正是从这里着手，抓住了一切通信和控制系统所共同具有的、很本质的一个特性。他说："……灵敏自动机的理论是一个统计的理论。通信工程的机器，根据单独一次输入而产生的动作是不会使人感到兴趣的。这种机器如果要能充分发挥作用，它就必须对全部输入都作出令人满意的动作。这也就是说，对一类从统计上预期要收到的输入做出统计上令人满意的动作。"

维纳在建立控制论的统计理论时，回顾和总结了自牛顿以来科学思想和科学方法论发展的趋势。在本书的第一章里，维纳通过对牛顿力学的相对性、局限性的分析，指出"即便在引力天文学中也有逐渐衰减的摩擦过程。没有一门科学完全符合于严格的牛顿式样。"维纳提出查理·达尔文研究进化论，他的儿子乔治·达尔文研究潮汐进化论，他的孙子查理爵士研究量子力学这一虽属偶然的事实，说明统计的、进化的观点正在渗透到科学的各个部门。

牛顿力学的辉煌成就，促进了统治着17世纪到19世纪自然科学思想的机械唯物论世界观的形成。机械唯物论者否认客观世界的偶然性，把偶然性和必然性绝对地对立起来，企图用拉普拉斯式的决定论来解释一切。因此，他们在深入到微观世界的原子物理学新发现的面前感到束手无策。他们中的一些人就不能不走向原来立场的反面，高谈什么"物质消失了"，"电子的自由意志"，否认客观必然性，否认客观规律。列宁在"唯物主义与经验批判主义"一书中对这种唯心主义思潮作了深刻的批判，他同时指出"新物理学陷入唯心主义，主要就是因为物理学家不懂辩证法。"

正像牛顿力学不能正确地反映微观世界一样，控制论所面对的问题也是无法用基于牛

◀哈佛大学里的约翰·哈佛雕像

顿力学的传统力学方法来解决的。自动控制系统的特点在于它能根据周围环境的某些变化来决定和调整自己的运动；显而易见，要建立关于自动控制的理论，不突破传统的力学方法，不摆脱拉普拉斯决定论，不摆脱机械唯物论，是绝对不可能的。维纳把控制论建立在统计理论的基础上，这就把关于自动控制的研究提到一个新的阶段。

为了给控制论建立一种统计理论，维纳在本书第二章分析批判了吉布斯的古典统计力学。这个统计力学是总结了热机的技术经验，"按照牛顿力学的本来面目"建立起来的，吉布斯统计力学的重要概念之一，同时也能用在古典热力学中的，就是熵的概念。一个孤立的系统中自发的过程是一个熵不断增加的过程，这个过程一直进行到熵达到极大值，也就是系统达到热平衡为止。吉布斯统计力学所处理的就是这样的自发地趋于热平衡的系统和过程。维纳认为这样的统计力学是不能直接用来研究控制系统的。他认为熵是系统无组织程度的一种测度，自发地趋于热平衡的孤立系统，无组织程度的确是不断增加，但是，一个控制系统不是一个孤立的系统，而是一个与周围环境密切联系的系统，特别是控制系统通过自己的反馈机构可以减少系统的"无组织程度"，因此，在控制系统中经常发生熵减少的过程。为了给这种系统建立一种统计理论，维纳在第三章提出了时间系列的统计力学问题。

维纳把控制系统所接收和加工的信息流看做一个时间系列(例如电话线中随时间迅速变化着的电压系列就是一个时间系列)。如我们在前面所指出的，控制系统接收和加工的信息具有一定的随机的性质，即有某种统计分布。如果从时间系列的观点看，这就是：一个控制系统可能接收和加工大量不同的时间系列，各个不同的时间系列的出现都有一定的概率。用统计力学的术语来说，也就是控制系统所有可能接收和加工的各个时间系列构成一个统计系综，其中每一个时间系列都是这个统计系综中的一个元。这样，维纳就解决了控制系统所接收和加工的信息流的统计性质的数学表示问题。

维纳在第三章中进一步提出了研究处的统计平衡的时间系列的问题。运用第二章讨论过的各态历经定理，维纳证明：在一定条件下，处在统计平衡的时间系列的时间平均等于相平均，有了这个前提，就可以从统计系综中任一时间系列过去的数据，求出整个系综的任一统计参数的平均。实质上也就是由过去可以从统计上推知未来，预测未来。维纳正是根据这一点，提出了他的著名的预测和滤波的理论。滤波的问题就是尽可能恢复一个被噪声干扰了的信息流的问题，实质上也就是预测一个被噪声搞混了的时间系列的问题，因之滤波问题仍是一个预测问题。所谓预测，从数学上讲，就是从一个时间系列过去的数据去估算整个系综的统计参数。这种估算得出的是统计参数的平均值，它与客观实在的参数值有一定距离，是会产生误差的。维纳在本章中提出了最优预测的公式，指出了如何使对统计参数的估算所产生的误差为最小。维纳的这项工作为设计自动防空控制炮火等方面的预测问题提供了理论根据，也为评价一个通信和控制系统加工信息的效率和质量从理论上开辟了一条途径。但是，维纳这方面的理论并没有完成，如他自己所说的"这里发展的统计理论，要求我们对所观测的时间系列的过去具有充分的知识，但无论在什么场合，我们都不能满足这个要求，因为我们的观测不能追溯到无限的过去，为了超出这个范围，使我们的理论发展成为一个实用的统计理论，必须推广现有的抽样方法。"同时，维纳的最优预测公式是针对线性的运算器(在数学上就是运算子)来说的，对于广泛的非线性运算子的最优预测问题尚待研究解决。

在本书的第四章和第五章，作者结合着对反馈系统的稳定性和计算机的记忆，运算和控制装置的特点的分析，讨论了神经系统活动的某些机制和病理学的问题。第六章作者利用从电视扫描引申过来的群扫描的概念和多级反馈系统的概念，讨论了视觉生理的某些问题和用一种感官来弥补另一种感官的缺陷的问题。第七章作者结合着对电子计算机工作可靠性的讨论，从控制论的观点设想了某些精神病理学现象的可能机制。在这些章节和本书的导言中，作者一再强调，在现代技术的基础上对生物机体的一些生理机制进行模拟的重要性，从控制论的观点研究这些机制的可能性。另一方面，作者也指出，生理学、心理学等方面的成就对形成控制论科学思想的重要影响。维纳在这些章节中阐述的见解大都是属于启发性的，缺乏足够的科学实验根据。但是，其中的一些见解已经为近十几年的研究工作所证实和发展，有一些则一直在引起广泛的争论，不管怎样，维纳的这些见解为自动控制技术的研究，为生物学、物理学和化学的研究开辟了一条重要的途径，则是肯定的。

在本书的最后一章，作者试图运用控制论的观点去分析社会发展的一些根本问题。应该说作者在进行这种研究时所采用的方法和得出的结论都是不能成立的。例如，作者离开了对社会基本矛盾的分析，把社会生活中通信工具这样一个纯技术性问题提到完全不适当的高度，从而得出通信工具越发达，社会就越不稳定的结论，并从此进一步得出“小小乡村社会”要比“大的社会”优越得多的反历史的结论。维纳的这种研究不但没有揭露事物的本质，反而以此掩盖了资本主义社会腐朽没落的真正原因。大家知道，资本主义“大社会”之所以危机重重，之所以不稳定，绝不是因为通信工具太发达，根本的原因在于生产的社会性和生产资料的私人占有这一不可调和的矛盾；解决矛盾的出路，绝不是倒退到“小小乡村社会”，而是通过社会主义革命建立生产资料社会所有的幸福繁荣的社会主义“大社会”。

控制论研究的是物质相互联系中一类特定的联系形式。这类联系形式在物质发展的最高级形态——社会生活的某些方面也是可能存在的。因此，在马克思主义历史唯物主义的科学思想指导下，把控制论作为一种辅助的工具去研究社会生活中某些方面的问题是可能有意义的。在本书的一些地方作者也提到控制论应用到社会科学领域的困难，但是，他是从社会现象的“统计游程太短”，无法应用统计理论，这样一个纯技术的观点提出问题的。事实却是，在社会科学的领域，离开了历史唯物主义这一唯一科学理论的指导，要想对社会生活的根本问题得出真正科学的结论，是不可能的。维纳的错误就在于企图把控制论作为一种独立的完整的科学方法去分析社会生活中的根本问题。

在本书的最后一章和书中其他一些地方，作者谈到了自动化的社会后果，表示了他对自动控制技术用于帝国主义战争和生产自动化带来的失业威胁的担忧。作为一个在资本主义社会工作的科学家，维纳对自己的科学发现可能引起的社会后果，抱着严肃的态度，表示不愿意参与直接为帝国主义战争服务的研究工作，这种态度是令人尊敬的。维纳的悲剧在于他看不清产生战争和失业的根本原因，看不到摆脱这种悲惨命运的根本途径和主要的阶级力量。因此，他在本书的一些地方虽然也表示对垄断资本统治的厌恶，要求“建立一个以人的价值为基础而不是以买卖为基础的社会”，但是，他对于能否实现这种社会变革则感到茫然，对于控制论能否造福于人类则认为只是“一个非常微小的希望”。维纳在本书许多地方一再流露的，对于科学技术和人类发展前途的严重的悲观

主义思想，反映着在帝国主义国家中，既对垄断资本的法西斯统治不满，又害怕无产阶级革命力量和社会主义国家的一类资产阶级知识分子彷徨苦闷的情绪。

在我们马克思主义者看来，事情是非常清楚的。在阶级社会，在帝国主义时代，"只能用阶级分析的观点，去看待科学技术的发展和使用的问题。"由于帝国主义制度是反动的、反人民的制度，所以，帝国主义国家总是要把各种科学技术用于侵略外国和威胁本国人民的军事目的，用于制造杀人的武器，总是要利用各种科学技术加重对劳动人民的剥削。在帝国主义国家，生产的自动化把社会生产力的发展和资本主义生产关系的矛盾推进到一个新的阶段，自动化的机器把大批劳动者排挤出来，造成严重的失业灾难。在社会主义国家，情形却完全相反。由于社会主义制度是进步的，是代表人民利益的，因此，社会主义国家总是要利用各种科学技术服务于国内和平建设，来征服自然；同时，也为了全世界人民的利益，用它来制止帝国主义战争，保卫世界和平。至于生产的自动化，在社会主义国家根本不会产生失业的问题。自动化的机器因为能够减轻劳动者的繁重劳动，能够大大提高劳动生产率，受到广大劳动者的热烈欢迎。在社会主义国家，生产自动化的研究，不但有专业的科学家、工程师在进行，而且已经形成了一个有广大劳动者参加的群众性的技术革新运动。由此可见，科学技术的发展和使用归根到底决定于社会制度，决定于哪个阶级在社会中占据统治地位。也就是，像控制论这样一些科学技术的新发现，在帝国主义国家，用维纳的语言来说，必然被用来"作恶"，在社会主义国家必然被用来"为善"。在帝国主义国家，任何科学家，如果真正希望用自己的科学发明为人民服务，而不为战争和剥削的事业服务，就必须反对帝国主义制度，就应该站到无产阶级方面来，在无产阶级领导下进行争取和平和社会主义的斗争。

维纳的这本书出版已经十几年。十几年来，以电子计算机为核心的各种控制机、信息机得到迅速的发展。科学技术的这些辉煌成就引起了许多国家科学界、哲学界关于机器能否学习、能否思维的广泛讨论，关于机器的"学习"、机器的"思维"这类的说法，有些人只是把它当做一种语言的借用，有些人则在认真地谈论着机器的思维，因为他们在讨论机器是否比人更聪明之类的问题。因此，如何在马克思主义思想指导下，正确地阐明和概括当代科学技术的这些最新成就，是摆在我国科学界和哲学界面前的一项重要任务。译者认为，在研究这些问题时，有一点是明确的，这就是把人和机器对立起来，去评价和比较两者的工作能力，这种思想只不过是资本主义生产关系的一种反映。资本主义生产关系造成生产资料和劳动者的分离。在资本家看来，生产资料和劳动者同为资本获得利润的手段，机器和雇佣劳动力是可以互相替换、互相竞争的。但是，当我们揭穿了资本主义生产关系的剥削实质，我们就看到任何机器都是人手和人脑的劳动的产物，机器永远是人进行劳动的工具。人的劳动和智慧的创造力是无穷无尽的，因此，这种创造力的产物——科学技术的发展，也是无穷无尽的。对于未来的机器的工作能力我们现在很难为它划定一个固定的范围，只能在科学技术已经达到的基础上对最近将来的发展作出各种估计。但是，不论科学技术如何进步，不论各种机器的工作能力如何发展，它们总是人的劳动的工具，如马克思所说的，总是人手和人脑的延长和加强。机器和人之间永远不存在谁比谁更聪明的关系。当然，把现在的机器和生物机体，电子计算机和人的大脑加以对比，研究其相似之处和相似的共同物质基础，研究其区别和产生本质区别的根本

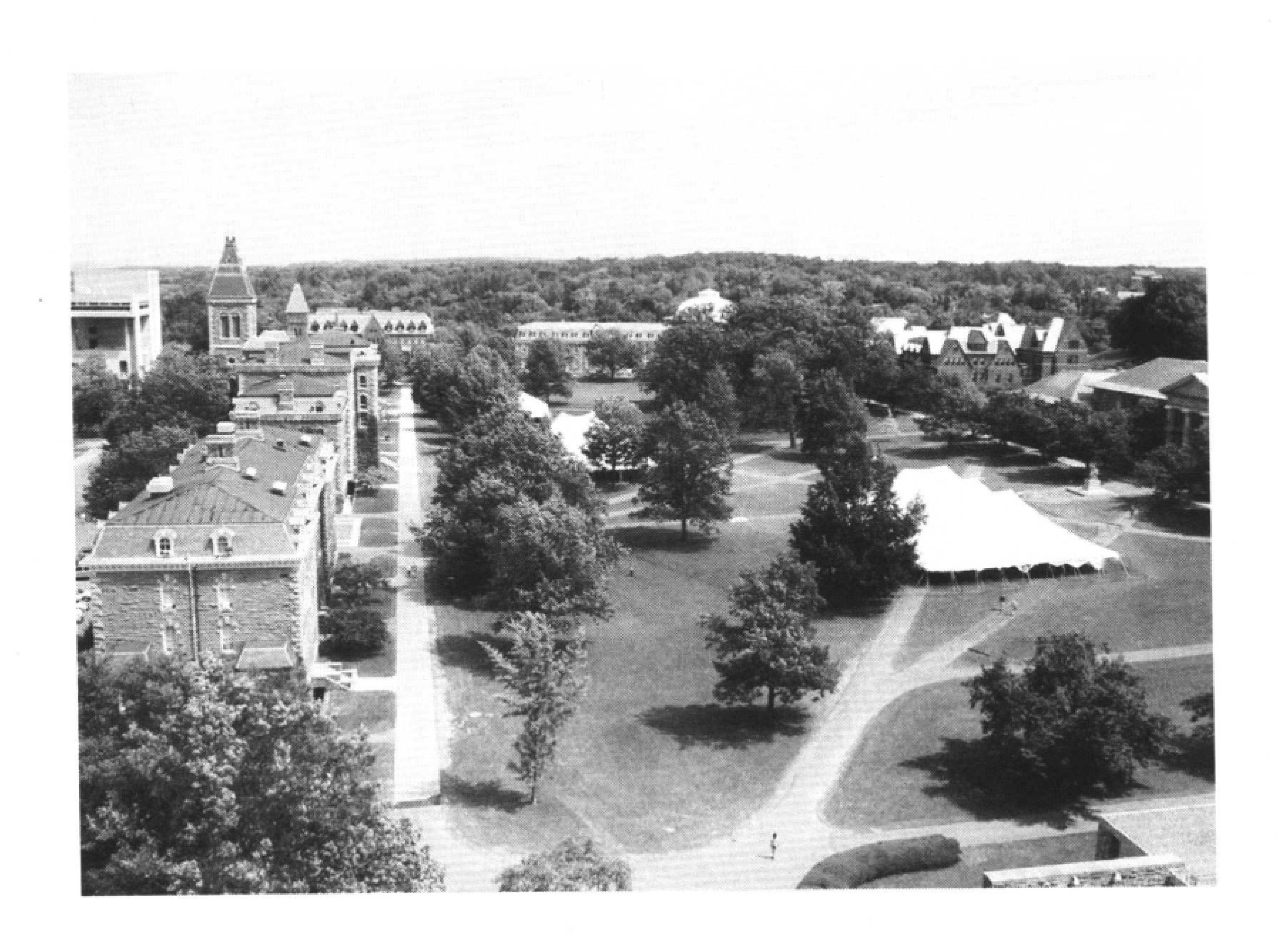
原因，研究在这些问题上高级运动形态和低级运动形态的区别和联系等等都是很有兴趣的。在马克思主义思想指导下，来研究这些问题，必将对哲学和现代科学的丰富和发展作出重要贡献。

※　　※　　※

译者在翻译本书时曾经参照俄文和日文译本作了些校正，并选用了两种译本的一些注解。为了说明译者对本书的理解和意见写了这篇译者序，限于水平，错误之处可能很多。希望读者对译文和译者序中不妥之处提出批评和指正。

译　者

1962 年 5 月



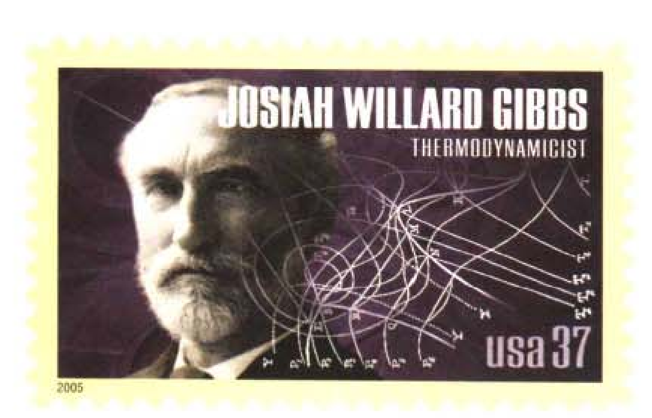


诺伯特·维纳（Norbert Wiener,1894—1964）

》》希尔伯特（David Hibert，1862—1943）。1914年，罗素要赴哈佛大学讲学半年，因此他建议维纳到德国格丁根大学进修几个月。在格丁根，维纳选修了希尔伯特讲授的微分方程、哲学家胡塞尔开设的康德哲学课，还有物理学家的群论。从希尔伯特身上，他不仅学到了必要的数学工具和技巧，更领略到一种博大精深的数学思想。



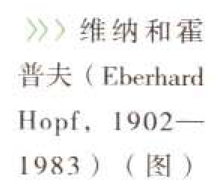
》》杜威（John Dewey，1859—1952）。1914年，因爆发第一次世界大战，剑桥大学已近乎关闭，不再是学习和研究学问的好地方，维纳只得无奈地告别剑桥。回到美国，他遵照临走前罗素提出的建议，到哥伦比亚大学师从实用主义哲学家和教育家杜威，在维纳心中，杜威是这里唯一能与剑桥和格丁根的教授相提并论的学者。



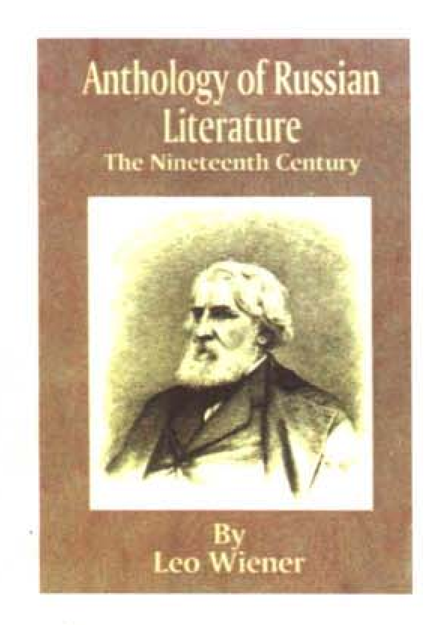
《《 维纳在麻省理工学院工作时，开始认识到吉布斯在统计力学方面的伟大工作，并自认为在其一生中这是智力上的一个里程碑。图为美国物理化学家吉布斯（Josiah Willard Gibbs，1839—1903）。

对布朗运动（图）的深入探索是维纳在数学方面从事的第一项重要研究。这也是他独立科研生涯的良好开端。





》》维纳和霍普夫（Eberhard Hopf，1902—1983）（图）合作完成了一篇关于一类奇异积分方程的论文，此方程后称为维纳-霍普夫方程，与此对应的维纳-霍普夫技术应用到了多个学科领域。

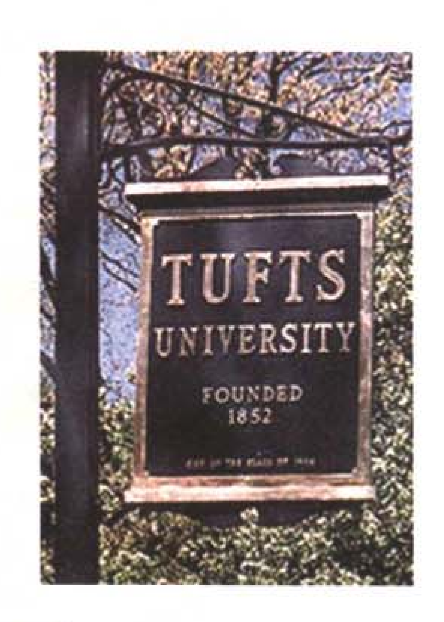


维纳的父亲利奥·维纳编写的《19世纪俄国文学作品选》。利奥是俄裔犹太人，哈佛大学斯拉夫语言和文学教授，懂二十多国语言。

维纳的父母伯莎·卡恩和利奥·维纳。他们于1893年结婚。1894年11月26日，维纳在密苏里州哥伦比亚市出生，他是家中的长子。



7岁的维纳。维纳从小智力超常，3岁时就能读写，只用了3年时间就读完了中学。



建于1852年的塔夫茨大学。1906—1909年，维纳在这所不太起眼、但又具有良好文化氛围的大学数学系学习，这样的选择是因为维纳的父亲认为：作为神童的维纳在这里学习，可以避免过于惹人注目而招致妒忌或排斥。



塔夫茨大学的标志建筑——西礼堂



《《 剑桥大学三一学院。1913年，维纳获奖学金到英国剑桥大学学习。



》》 1916年的罗素（Bertrand Russell，1872—1970）。在剑桥大学，维纳的导师罗素给了维纳很多指点，建议维纳在研修逻辑的同时，进一步加强数学的训练，还鼓励他钻研爱因斯坦的相对论、卢瑟福的电子理论、玻尔的量子理论，这极大地开拓了他的视野，深化了他的思想。在维纳一生的科学生涯中，罗素无疑是个极重要的引路人。此后，维纳选择把数学和物理、工程学结合起来的研究方向，就是因为受了罗素的启蒙。

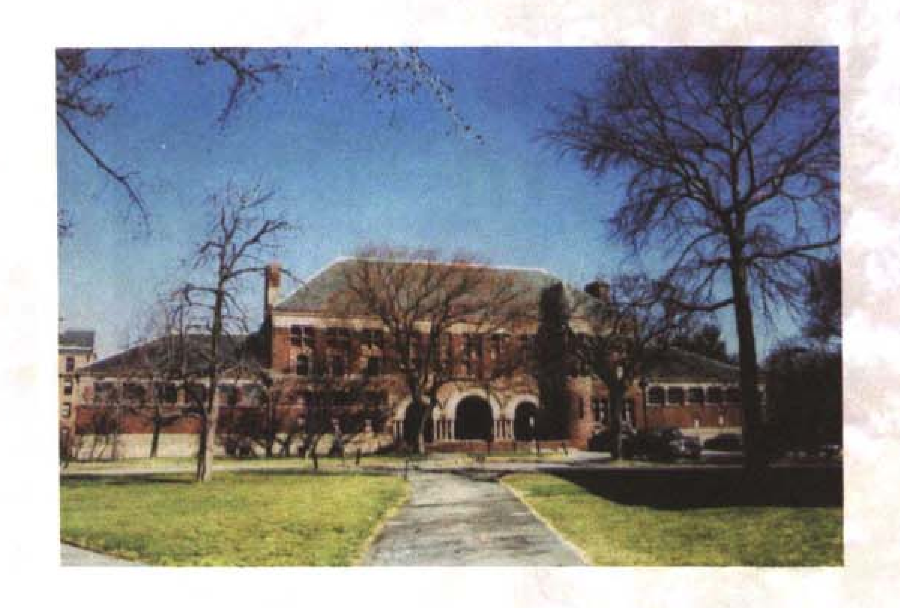


维纳在剑桥的数学导师哈代（Godfrey Harold Hardy，1877—1947）（约摄于1910年）。维纳认为，在获得博士学位以后，哈代是对他一生的数学研究影响最大的人。



维纳在剑桥的数学导师李特尔伍德（John Edensor Littlewood，1885—1977）。传说维纳第一次遇见李特尔伍德时说"噢，还真有你这么个人。我原以为Littlewood只是Hardy（哈代）为写得比较差的文章署的笔名呢。"维纳本人对这个笑话很懊恼，在自传中极力否认此事。

>>> 哈佛大学校园景。1909年，维纳和另外四位神童一起被招收到哈佛。维纳最初的目标是哈佛研究院的生物学博士学位，但一学期下来，维纳的父亲觉得维纳在塔夫茨学院时就显露了对哲学的兴趣和特长，他应当向康奈尔大学的哲学院申请奖学金，以便将来成为一位哲学家。





<<< 康奈尔大学校园景。1910年夏，维纳获得了康奈尔大学提供的为期一年的奖学金，前往该校学习哲学。这一年，维纳选修了一系列哲学课程，包括研读柏拉图的希腊原文著作《理想国》和17、18世纪英国古典哲学，尝试写了几篇哲学论文，但他在哲学上的研究属于一般水平，学年即将结束时，自知继续获取奖学金无望，于是在1911年9月，以哲学博士候选人的身份回到了哈佛，继续最后两年的学习。

>>> 1913年夏初，18岁的维纳以关于数理逻辑的论文获得了哈佛大学哲学博士。在授予博士学位的仪式上，执行主席看他一脸稚气，颇为好奇，于是便当面询问他的年龄。维纳的回答十分巧妙："我今年岁数的立方是个四位数，岁数的四次方是个六位数，这两个数正好把0—9这10个数字全用上了，不重不漏。这意味着全体数字都向我俯首称臣，预祝我将来在数学领域里一定能干出一番惊天动地的大事业。"维纳此言一出，满座皆惊，无不被他奇妙的回答所深深吸引。





1918年，维纳在美国马里兰州阿伯丁试验场。在此，维纳参加了弹道学的研究，也圆了自己的士兵梦。

Grenoble, July 27, '25

Dear Bertha,

I gave my paper here today — partly in English and partly in bad French. It fell flat — but there were only five people present, none of them an analyst, and only one of them of any mathematical significance whatever. That one (Cartan [illegible]) was introduced to him as Mr Wiener, he said "Not Norbert Wiener?" I tell you kid!

My French is down to low water mark. In the last four weeks, I have got into the habit of thinking in German, and every now and then I get the wires crossed. It'll come back soon enough. But I am beastly tired from the trip from Leipzig — the first 24 hours without lying down — and I suppose my trouble is to be

[illegible] English (although he has French, Italian and some Spanish)

Having thus travelled enough, and being at the end of my third sheet of paper, I conclude by asking for news of [illegible] amidst the [illegible] and mosquitos.

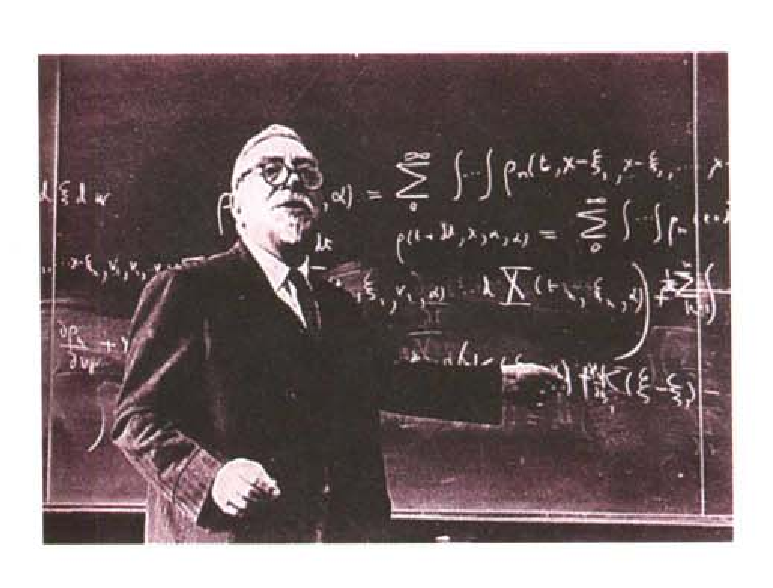
Your loving brother,

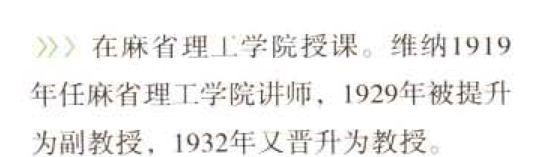
Norbert

1925年7月27日，维纳致他的妹妹Bertha的信。信中他详细地描述了当年在火车上偶遇爱因斯坦的情景。



1925年，维纳与玻恩（Max Born，1882—1970）在剑桥研讨。

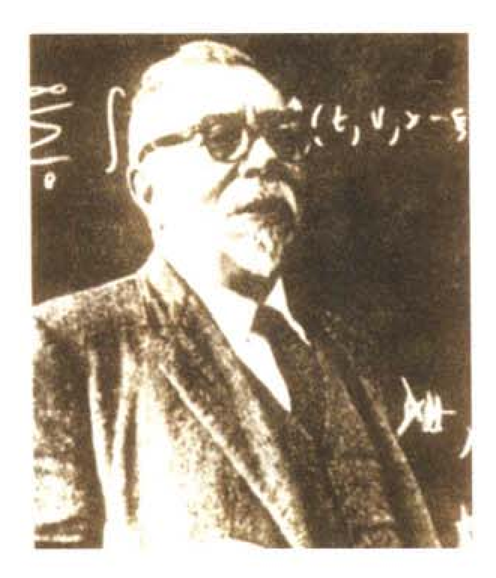




在麻省理工学院授课。维纳1919年任麻省理工学院讲师，1929年被提升为副教授，1932年又晋升为教授。

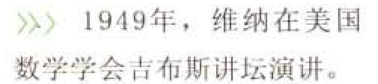
>>> 美国数学学会大厦。1926年，维纳入选美国艺术和科学院，1933年当选为国家科学院院士，同年，因在陶贝尔型定理方面的成就，他荣获了美国数学会5年颁发一次的博歇奖。1934年维纳当选为美国数学学会副会长。但维纳对荣誉和头衔并不感兴趣。科学院每年竞选新成员时，难免出现激烈的竞争和讨价还价现象，这些令他十分讨厌，所以他不久便辞去了科学院院士的资格。





<<< 1934年，在美国数学学会研讨会上。1933—1935年，维纳是数学学会会议最积极的参与者。





>>> 1949年，维纳在美国数学学会吉布斯讲坛演讲。



<<< 美国马里兰大学数学楼。诺伯特·维纳中心位于该楼圆形大厅的二层。



1955年，维纳、巴洛(John S. Barlow)和罗森布里斯(Rosenblith)在观察脑电波的自相关函数。

1964年1月，维纳在白宫接受约翰逊总统颁发的美国国家科学奖奖章。维纳因“在纯粹数学和应用数学方面并且勇于深入到工程和生物科学中去的多种令人惊异的贡献及在这些领域中具有深远意义的开创性工作”而获此奖章。



瑞典斯德哥尔摩旧城。1964年3月18日，维纳在斯德哥尔摩讲学时，因心脏病突发逝世。





社会学和人类学基本上是通信的科学，属于控制论这个总题目。经济学是社会学的一个特殊分支，它的特点是具有比社会学的其余分支好得多的关于价值的数值量度，而它也是控制论的一个分支。所有这些领域都具有控制论的一般思想。控制论还影响到科学哲学本身，尤其是科学方法和认识论即知识理论的领域。

——维纳

维纳从小就智力超常，3 岁时就能读写，14 岁时就大学毕业了，18 岁获哈佛大学博士学位，被誉为旷世神童。

科学素养文库·科学元典丛书

主　　编　任定成

执行主编　周雁翎

策　　划　周雁翎

目 录



弁言 / 1

《控制论》导读 / 1

《控制论》中译本和它的译者"郝季仁" / 1

中译本第二版前言 / 6

译者序 / 7

原著第二版序言 / 1

第一部分 初版(1948) / 9

导言 / 11

第一章 牛顿时间和柏格森时间 / 31

第二章 群和统计力学 / 43

第三章 时间序列,信息和通信 / 55

第四章 反馈和振荡 / 81

第五章 计算机和神经系统 / 97

第六章 完形和普遍观念 / 111

第七章 控制论和精神病理学 / 119

第八章 信息、语言和社会 / 129

附注 / 137

第二部分 补充的几章(1961) / 141

第九章 关于学习和自生殖机 / 143

第十章 脑电波与自行组织系统 / 153

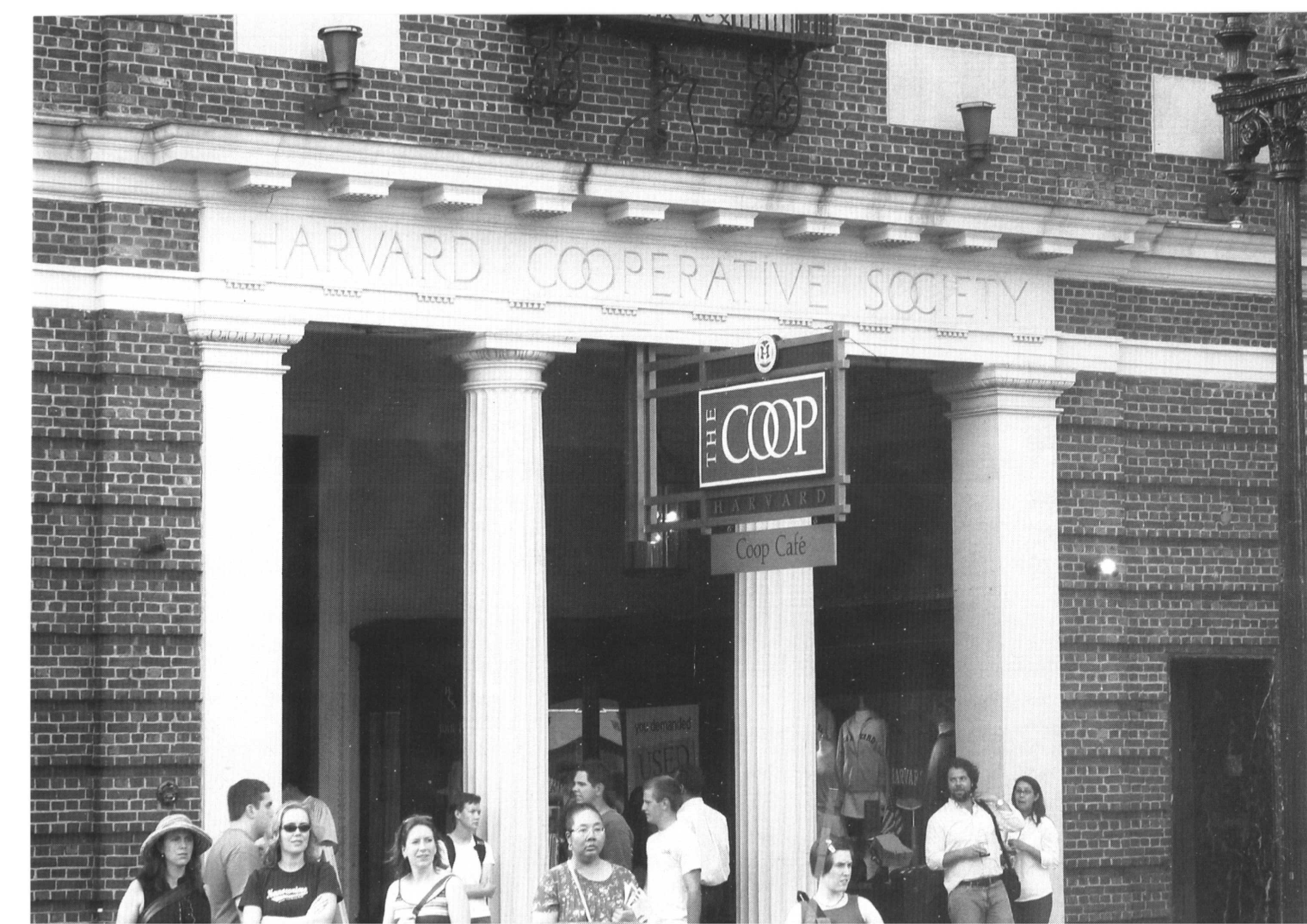
原著第二版序言

· Preface to the Second Edition ·



我最担心的事之一是原子弹对于科学和公众对待科学家的态度所产生的影响。……我们原以为战争以后，会像以前一样，恢复国内和国际自由交流学术成果的风气，而这才是真正的科学生活。但是，科学工作者发现，不管愿意与否，自己仍是整个国家存亡所系的机密的看管人。在可以预见的将来，自己不可能重新作为自由人来从事研究。

——维纳


HARVARD COOPERATIVE SOCIETY
THE COOP
HARVARD
Coop Café
you demanded
USED

大约13年前，当我写《控制论》初版的时候，我是在某些严重困难的条件下进行这一工作的，它使初版不幸产生许多排印上的错误和少数内容上的错误。现在，我相信这样的时刻已经来到，控制论已经不只是被当做要在未来某一时期方能实现的计划，它已经是一门现存的科学。因此，我借这个机会，根据读者的要求，对初版做了必要的改正，与此同时，根据这门学科的现状和初版问世以来出现的有关的新思想方法，把初版加以扩充。

如果一门新的科学学科是真正有生命力的，它的引人兴趣的中心就必须而且应该随岁月而转移。当我开始写"控制论"的时候，我发现说明我的观点的主要困难在于：统计信息和控制理论的概念，对当时传统的思想来说，不但是新奇的，也许甚至是对传统思想本身的一种冲击。现在，这些概念已经成为通信工程师和自动控制设计师手中如此熟悉的工具，以至我现在主要要担心的是，本书是否会被人认为已经陈旧和平庸。反馈的重要性在工程设计和生物学中都已经牢固地奠定了，信息的应用、量测和传输信息的技术成为训练工程师、生理学家、心理学家和社会学家不可少的一部分。当本书初版发行时，自动机还仅仅是一种预测，现在已经取得了自己的地位，至于我在本书中和在《人有人的用处》[①]的通俗小册子中一再警告过的、与自动化相联系的社会危机则已经从地平线上升起很高了。

因此，控制论学家应该继续走向新的领域，应该把他的大部分注意力转到近十年的发展中新兴的思想上去。各种简单的线性反馈的研究，在唤起科学家对控制论的研究方面曾经是十分重要的，但是，这些反馈现在看来已经并不像它们最初所显出的那样简单和线性的了。的确，在早期的电路理论中，系统处理线路网络的数学方法并没有超出对电阻、电容、电感的线性并置。这就是说，整个问题只要用对被传输消息的调和分析和消息所通过的线路中的阻抗、导纳及电压比就足够加以描述。

在《控制论》出版很久以前，人们就已经开始认识到，上述框子不易适于对非线性电路（如我们在许多放大器、电压限制器、整流器和其他器件所发现的）的研究。虽然如此，由于缺乏一种较好的方法，把老的电机工程的线性概念加以扩充，扩充到远远超出这些新的装置能够用这些老概念自然地加以表示的范围的种种尝试一直在进行着。

大约是1920年，当我来麻省理工学院的时候，处理与非线性装置有关的问题的一般方式是把阻抗概念设法加以扩充，使它既包括线性系统，又包括非线性系统。结果使得非线性电机工程的研究陷入一种类似托勒密天文学系统的最后阶段所处的那种状态，那时的托勒密天文学是本轮上再套以本轮，修正上面加修正，直到那庞大的杂凑的结构最后在自身重量的作用下被压垮。

正像哥白尼系统从捉襟见肘的托勒密系统的残骸上升起，以它简单而自然的日心说

① Wiener, N., The Human Use of Human Beings; Cybernetics and Society, Houghton Mifflin Company, Boston, 1950.

◀哈佛大学 COOP 书店

代替复杂而不清楚的托勒密地心说来描述天体的运行一样，非线性结构和系统（不论它们是电气的或机械的，天生的还是人造的）的研究也需要一个新的、独立的出发点。我在《非线性问题的随机理论》①一书中曾试图为此开辟一条新途径。现在弄清楚了，在处理线性现象时极为重要的三角分析，在我们研究非线性现象时并不要它。有一个十分明白的数学上的理由来说明这个问题，电路现象，像许多其他的物理现象一样，都存在一种不变性作为它的特征，这种不变性是对时间原点的移动为不变来说的。一个物理实验，如果从中午开始，要到2点钟才达到某一阶段，假设从12点15分开始，则要到2点15分才能达到那同一阶段，也就是说，物理定律对于时间平移群是不变式。

对于上述的平移时间群，三角函数 $\sin nt$ 和 $\cos nt$ 也有某个重要的不变式。在 t 上加 τ 的平移，使一般函数

$$e^{i\omega t}$$

变成

$$e^{i\omega(t+\tau)}=e^{i\omega\tau}e^{i\omega t}$$

的形式，这是与前一函数相同的函数。因为

$$\begin{aligned} a\cos n(t+\tau)+b\sin n(t+\tau) &= (a\cos n\tau+b\sin n\tau)\cos nt \\ &\quad +(b\cos n\tau-a\sin n\tau)\sin nt \\ &= a_1\cos nt+b_1\sin nt, \end{aligned}$$

也就是说，函数族

$$Ae^{i\omega t}$$

和

$$A\cos\omega t+B\sin\omega t$$

在平移下是不变式。

还有另外一些函数族它们也是平移的不变式。我们来看看所谓随机行走，做这种行走的一个粒子的运动在任何时间间隔内都有一个分布，这个分布只与时间间隔的长度有关，而与这时间间隔的起始点无任何关系，随机行走系综经时间平移后也仍然是自己本身。

也就是说，有别的函数集也具有三角曲线的那种纯平移不变性。

三角函数在这种不变性上还附带有一种性质作为它的特征，这就是

$$Ae^{i\omega t}+Be^{i\omega t}=(A+B)e^{i\omega t}$$

因此，这些函数形成一极简单的线性集。请注意这种性质与直线性有关；也就是我们可以把频率一定的所有振动都化为两个振动的线性组合。正是这一特性使调和分析在处理电路的线性性质时具有价值。函数

$$e^{i\omega t}$$

是平移群的特征标，从这函数得出这种群的线性表示。

---

① Wiener, N., Nonlinear Problems in Random Theory, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

当我们要进行的函数组合不只涉及常系数相加时——如当把两函数互乘时——简单三角函数不再有这种初等群的性质。另一方面，随机行走中显示出来的随机函数却具有某种非常适合于用来讨论非线性组合的性质。

我不想在这里详细讨论这个问题，因为它在数学上过于复杂，在我的《随机理论的非线性问题》书中涉及了这个问题。书中的材料已经在讨论特殊的非线性问题时发挥很大的作用，但是要实现书中提出的计划，还有许多工作要做。它在实践中的结论就是：在研究非线性系统时，布朗运动的特征标比三角函数集更适于用来作为测试用的输入。在研究线路时，布朗运动的函数可以用物理方法靠散粒效应来产生。散粒效应是电流中的一种不规则现象，它是由于电流并不是由一连续的电的流动所引起的，而是由一系列可分开的、相等的电子的流动所引起的。因此，电流具有统计的无规则性。电流本身有一定的均匀特性。但当它被放大到某一倍数时，就显示它包含有相当大的随机噪声。

我将在第九章中表明，随机噪声的这种理论不只是可在电路和其他非线性过程的分析上加以实际应用，而且在它们的综合上同样可以加以应用[①]。用来实现这些目的的仪器，把有随机输入的非线性装置的输出，化为一由某些规格化正交函数组成的特定系列，这些函数与厄米特多项式很相近。非线性线路的分析问题在于用平均的方法，从输入的某些参数来定这些多项式的系数。

这种方法的说明是非常简单的。用黑箱表示一个尚未分析出来的非线性系统，还有，我把某些具有已知结构的物体叫做白箱，用它们表示所求展开式的各项[②]。我把同一随机噪声加进黑箱和一给定的白箱。在黑箱的展开式中，给定白箱的系数由黑箱和那白箱的输出的乘积的平均值来给定。这个平均值是对散粒效应输入的整个系综的平均值，但是有一条定理允许我们一般都可以用一个对时间的平均值来代替这个对系综的平均值，只有一组概率为零的情形不允许这样做。要得到这个对时间的平均值，我们只需一个随便什么乘法器，用它得到黑箱和白箱输出的乘积，至于平均器，不用说我们可以利用下述事实，即电容器上的电压与电容器中的电量是成比例的，因此，也是与通过电容器的电流的时间积分成比例的。

构成黑箱的等价表示式的各相加白箱的系数不但可以逐一确定，而且可以同时定出来。甚至还可以利用适当的反馈装置，使每一个白箱自动调节自己到与黑箱展开式中它的系数相应的水平。这样我们就能制造一个多用白箱，当这个白箱与一黑箱恰当地连接起来，并使两箱接上同一随机输入时，这个白箱将会自动地使自己成为那个黑箱的运算上的等价体，虽然它们的结构可以有很大的不同。

这些分析，综合的操作和白箱把自己自动调节到和黑箱相等的操作都可以用另外一

---

① 我在这里用“非线性系统”一词并不排除线性系统，而是包括很大一类系统。用随机噪声来对非线性系统加以分析的方法也适用于线性系统，而且已经这样用了。

② “黑箱”和“白箱”两词是一种方便而形象的说法，它们的含义还不十分确定。我把黑箱理解为这样一种装置，它是有两个输入端和两个输出端的四端网络，它对输入电压的现在和过去实行一确定的操作，但是关于它靠什么结构来执行这种操作，我们并不必须知道任何信息。另一方面，白箱也具有类似的网络，它是我们为了获得输入-输出间一事先确定的关系，根据特定的构造计划，在输入和输出电压之间建立起联系的那种网络。

种由亚玛·博丝(Amar Bose)教授[1]和格博(Gabor)教授[2]提出的方法来实现。在所有这些方法中,用了一套发动和学习的程序,这些程序是通过为黑箱和各白箱选择恰当的输入并把两种箱子加以比较来实现的;在许多这类的程序中,包括格博教授的方法所用的程序中,乘法装置都起着重要作用。用电的方法使两个函数相乘的问题虽然有许多途径可走,但在技术上却不容易实现。一方面,一个好的乘法器必须在一个很大的振幅范围内工作。另一方面,为了使它在高频时保持准确,它的操作必须几乎是立即瞬时完成的。格博要求他的乘法器频率变化范围近 1 000 周。在他担任伦敦大学科学和工艺皇家学院电机工程教授的就职演说中,他没有明显地说出他的相乘方法适用的频率范围,也没有说出它们能达到的准确度。我迫切等待着这些性质的明显说明,以便能对这种乘法器用在与它有关的其他仪器上的价值作出可靠的估计。

所有这些装置里面都有一个仪器能根据过去的经验使自己采取特定的结构或功能,这样的装置引起工程学和生物学中一种非常新的看法。在工程学中,具有类似性质的装置,不但能够用来做游戏和作其他有目的的行动,而且它在做这些事情时,还可以根据过去的经验来不断地改进自己的行为。我将在本书第九章讨论这方面的某些可能性。生物学上,我们至少也遇到类似的现象,它们可能是生命的主要现象。遗传之所以可能,细胞之所以繁殖,必须靠细胞中携带遗传的部分——即所谓基因——能够建造另一个和自己相像的同样的携带遗传的结构。因此,如果有一种方法,使得人造的结构能够生产出另一与自己的功能相同的结构出来,这将是非常激动人心的事。我将以第十章专门研究这个问题,特别要讨论一给定频率的振荡系统怎样来把另一些振荡系统变成与它的频率相同的振荡系统。

人们常说产生任何一特殊种类的分子使它和一现存的分子相同的问题与工程中使用样板的问题相类似,因为我们用一部机器的一个功能元件作为样子,靠它把另一个相同的元件做出来。样板的阴模是一个静态的东西,而一个基因分子制造另一个基因分子则必须有某个过程。我有一个尝试性的意见:频率(例如分子谱线的频率)可以是样板元件,生物物质的相同由它来实现;基因的自繁殖可能是我要在后面讨论的频率自繁殖的一种表现。

我已经一般地谈到过学习机。我将用一章来详细地讨论这些机器、实现它的可能性和涉及它的应用的某些问题。这里我只打算作一点一般性的说明。

如第一章中将看到的,学习机的概念与控制论本身是同时出现的。在我提到的防空预测器中,预测器的线性特性决定于我们对打算预测的那个时间序列的统计系统的长期认识。当对这些线性特性的知识能够根据我在该章中给出的原则从数学上计算出来时,我们就完全能够设计一种计算器,用它算出这些统计特性,把预测器的短期特性用这同一个机器在进行预测中已经得到的经验来表示,而且这种表示是自动地完成的,这种方法能远远超出纯粹的线性预测器的范围。在卡里安帕尔(Kallianpur),马塞里

---

[1] Bose, A. G., "Nonlinear System Characterization and Optimization", IRE Transactions on Information Theory, **IT-5**, 30-40(1959)(Special Supplement to IRE Transactions).

[2] Gabor, D., "Electronic Inventions and Their Impact on Civilization", Inaugural Lecture, March 3, 1959, Imperial College of Science and Technology, University of London, England.

(Massani),亚郭托维奇(Akutowicz)和我自己[1]的许多论文中,已经发展了一种非线性预测的理论,这种预测想必至少可以用相同的方法来机械化,即利用长期观察为短期预测建立一统计基础。

线性的和非线性的预测理论都涉及预测的切合程度的某种判定标准。最简单的判定准则就是使误差的均方值减到最小,虽然这个准则绝不是唯一有用的准则。这个准则以一种特殊的形式联系布朗运动的泛函加以应用,我用这些泛函来构造一个非线性仪器,只要我的展开式中有许多项具有一定的正交性。这些正交性使得有限数目的这些项的部分和就是那要仿造的仪器的最好的模仿,只要保持住误差的均方判定准则的要求,我们就能用这些项来制造那仪器,格博的工作也是建立在误差的均方判定准则上,但是通过一种更普遍的方法,它能够应用到由经验获得的时间序列上。

学习机的概念可以扩充到远远超出应用预测器、滤过器和其他类似仪器的范围。研究和制造出能玩象棋之类的竞争性游戏的机器是特别重要的。这方面萨美埃尔(Samuel)[2]和瓦坦拉比(Watanabe)[3]在国际商业机器公司的实验室已经进行了重要的工作。在滤过器和预测器的情况下,时间序列的某些函数都由一大类本身能够被展开的函数来表示。这些函数对于决定游戏取胜有意义的量都有一数值计算。这些量包括例如双方棋子的数目,这些棋子的总活动范围,它们的机动性等等。在开始使用机器时,各种不同的走法上的考虑都被给定一尝试性的权重(tentative weightings),机器选择一种规则上容许的,总权重为最大值的走法。到此为止机器还是按定死的计划来工作,还不是一部学习机。

但是,有时机器执行另一种不同的任务。它试着把那个函数(该函数值在游戏取胜时为1,失败时为0,平局时可能为1/2)用许多函数来展开,这些函数代表的是机器能够认识到的那些方案。这样,机器重新确定这些方案的权重,使自己能玩更复杂的游戏。我将在第九章中讨论这类机器的某些性质,但是我在这里要指出,已经非常成功地使机器在经过10到20小时的学习和工作后,能够击败它的设计者,我还想在那一章中提到在类似的机器上进行的研究工作,这些机器设计来证明几何定理和在有限的程度内模拟逻辑推理。

所有这种工作都是自动程序设计的理论和实践的一部分,在麻省理工学院电子系统实验室,对于自动程序设计进行过深入的研究。现在已经发现,除非用上某种学习机器,要设计出一部严格模仿其他机器的机器是一件非常困难的事,而现在却迫切需要有能设计这种程序的机器。

现在,学习机的概念不但应用于我们制造出来的机器,而且适用于我们叫做动物的那些活机器,因此,有可能给生物控制论以新的希望。在许多最近的研究工作中,我愿意

---

① Wiener, N., and P. Masani, "The Prediction Theory of Multivariate Stochastic Processes", Part I, Acta Mathematica, **98** 111-150(1957); Part II., ibid., **99**, 93-137(1958). Also Wiener, N., and E. J. Akutowicz, "The Definition and Ergodic Properties of the Stochastic Adjoint of a Unitary Transformation", Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, Ser. II. **VI**, 205-217(1957).

② Samuel, A. L., "Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers", IBM Journal of Research and Development, **3**, 210-229(1959).

③ Watanabe, S., "Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation", IBM Journal of Research and Development, **4**, 66-82(1960).

指出斯坦莱-约里斯《论生命系统的控制论》[*Kybernetics*(请注意控制论一词的拼法)*of living systems*]一书①。在这本书中，他们对神经系统的反馈给予了很大的注意，这些反馈工作水平，又像其他对特殊刺激起反应的反馈一样能保持神经系统的工作水平。既然系统的工作水平与特殊反应的组合在很大范围内是乘性的，这种组合也就是非线性的，而且具有我们已提及的那种种性质。这个领域的工作最近非常活跃，希望它在不久的将来变得更为活跃。

我曾经提出过的记忆机和自繁殖机的方法在很大程度上要靠具有高度专门化的装置，或者我叫它蓝图式的装置才能实现。同一过程的生理方面必须更多地符合生命机体某些特有的机能，在生命机体中，依照蓝图行事的过程为另一较不专门化的，但使系统能组织自己的过程所代替。本书第十章专门研究了自行组织过程的一个实例，即由于这种过程，在脑电波中出现狭窄的，高度分化的频率。因此，第十章大部分是前一章在生理学上的补充，前一章中我在较为蓝图式一点的基础上讨论了同一过程。脑电波中有谱线很细的频率以及我提出的解释它们是怎样产生出来的理论，它们能起什么作用，它们可以有什么医学上的应用，所有这些，在我看来，都是生理学中重要的新的突破。类似的概念也可以用在生理学的许多其他地方而且可以对生命现象的基本研究作出真正的贡献。在这个领域中，我刚才提出来的东西与其说是已经完成的研究结果，不如说还是一个研究计划，但是却是一个我对之抱很大希望的计划。

不论是初版或本版中，我都没有想把本书写成一本包括控制论中所有进行过的工作的纲要。这既不是我的兴趣所在，也不是我的能力所及。我注意的是表明和详述我在这门学科上的思想，摆出那些开始引导我进入这个领域和在它的发展中继续引起我的兴趣的某些观念和哲学上的考虑。因此，本书纯粹是一本阐述个人思想的书，书中对于我自己感兴趣的那些东西给予了很大的篇幅，对于我自己没有研究过的东西，篇幅却较小。

在修订本书时，我从各方面得到有力的帮助。我要特别提到康斯坦斯(Constance)小姐，麻省理工学院出版社的波伊德(D. Boyd)，东京工艺研究所的池原志子(Shikao Ikehara)博士，麻省理工学院电机工程系的李郁荣博士，贝尔电话实验室的拉伊斯别克(Gordon Raisbeck)的合作。还有关于我写出的新的几章，特别是关于第十章的计算(计算中我考虑到自行组织系统的问题，这种系统在研究脑动电流图时可以发现)，我要提到从我的学生柯特洛(John C. Kottelly)和罗滨逊(Charles E. Robinson)所得到的帮助，特别还要提到麻省省立医院巴洛(John S. Barlow)博士的帮助。索引是由戴维斯(James W. Davis)做的。

没有他们这些人的专心致意，我是既没有这种勇气，也不可能这样正确地写出这新的修订版。

诺伯特・维纳

剑桥，马萨诸塞州

1961 年 3 月

① Stanley-Jones, D., and K. Stanley-Jones, Kybernetics of Natural Systems, A Study in Patterns of Control, Pergamon Press, London, 1960.

第一部分　初版(1948)

· *Part I Original Edition* ·



有一次维纳乔迁，妻子熟悉维纳的方方面面，搬家前一天晚上再三提醒他。她还找了一张便条，上面写着新居的地址，并用新居的房门钥匙换下旧房的钥匙。第二天维纳带着纸条和钥匙上班去了。白天恰有一人问他一个数学问题，维纳把答案写在那张纸条的背面递给人家。晚上维纳习惯性地回到旧居。他很吃惊，家里没人。从窗子望进去，家具也不见了。掏出钥匙开门，发现根本对不上齿。于是使劲拍了几下门，随后在院子里踱步。突然发现街上跑来一小女孩。维纳对她讲："小姑娘，我真不走运。我找不到家了，我的钥匙插不进去。"小女孩说道："爸爸，没错。妈妈让我来找你。"



剑桥大学最大的学院——三一学院

导　言

· Introduction ·



维纳的父亲的藏书十分丰富，门类齐全，无所不包。有汉语辞典和稀有语种的语法，故弄玄虚的神学书，也有中东地区的出土文物报告，维多利亚王朝后期的科学入门书，还有精神病学、电气实验以及博物学方面的著作。在父亲的指点下，维纳六岁的时候就已熟读达尔文等人的科学作品。父亲并不指望维纳能理解他自己所读的全部内容，而主要是想培养他的科学精神。他鼓励维纳经常提问，回答这些问题的时候则尽量使维纳感到，即使没有别人的帮助，自己也应当有能力解决问题。为了让维纳的兴趣爱好能长久地保持，父亲表现出对他所做的任何事都感兴趣，同时，还启发他提出自己的观点。显然，这些做法对维纳的科学思想和科学方法的形成起到了关键性的作用。



这本书是十多年来我和当时在哈佛医科学校、现在在墨西哥国立心脏学研究所的阿托罗·罗森勃吕特博士共同研究的成果。在那些日子里，罗森勃吕特博士（他是已故的华尔特·皮·堪农博士的同事和合作者）领导了一个每月举行的关于科学方法的讨论会。参加者大都是哈佛医科学校的青年科学家，我们一起在日德毕尔特大厅围着圆桌子吃饭。谈话是活泼的，毫无拘束的。这可不是一处鼓励任何人或者使任何人有可能摆架子的地方。饭后，由某一个人，或者是我们这个集体中的一员，或者是一位邀请来的客人，宣读一篇关于某个科学问题的论文，通常这是一篇其首要思想，或者至少其主导思想是关于方法论问题的论文。宣读者必须经受一通尖锐批评的夹击，批评是善意的然而毫不客气的。这对于半通不通的思想，不充分的自我批评，过分的自信和妄自尊大真是一剂泻药，受不了的人下次不再来了。但是，在这些会议的常客中，有不少人感到了这对于我们科学的进展是一个重要而经久的贡献。

并不是所有的参加者都是医生或医学科学家。我们中间有一个人，他是一个非常坚定的成员，对于我们的讨论有很大的帮助，这就是曼纽尔·桑陀瓦尔·瓦拉尔塔博士，他和罗森勃吕特博士一样，也是墨西哥人，在马萨诸塞理工学院当物理教授，他是我在第一次世界大战之后到这个学院来教书时的最初的学生之一。瓦拉尔塔博士常常带领一些麻省理工学院的同事来参加这些讨论会，正是在这些讨论会的某一次会上，我初次会见了罗森勃吕特博士。我长时期以来就对科学方法很感兴趣，曾经参加过 1911—1913 年间在哈佛由约瑟夫·劳埃斯领导的关于这个题目的讨论班；况且，他们感到，有一个能够批判地考虑数学问题的人参加进来，是很重要的，因而我就成了这个集体的积极成员，直到 1944 年罗森勃吕特博士叫我到墨西哥去而且战时的混乱状态结束了这一系列的讨论会为止。

许多年来，罗森勃吕特博士和我共同相信，在科学发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。从莱布尼兹以后，似乎再没有一个人能够充分地掌握当代的全部知识活动了，从那时候起，科学日益成为科学家在愈来愈狭窄领域内进行着的事业。在 19 世纪，也许没有莱布尼兹这样的人，但还有一个高斯，一个法拉第，一个达尔文。今天，没有几个学者能够不加任何限制而自称为数学家，或者物理学家，或者生物学家。一个人可以是一个拓扑学家，或者一个声学家，或者一个甲虫学家。他满嘴是他那个领域的行话，知道那个领域的全部文献，那个领域的全部分支，但是，他往往会把邻近的科学问题看做与己无关的事情，而且认为如果自己以这种问题发生任何兴趣，那是不能容许的侵犯人家地盘的行为。

这些专门化的领域在不断增长，并且侵入新的疆土。结果就像美国移民者、英国人、墨西哥人和俄罗斯人同时侵入俄勒冈州所造成的情形一样——大家都来探险、命名和立法，弄得乱七八糟、纠缠不清。有这样一些科学工作的领域，我们在本书的正文中将要讨论到，人们从纯粹数学、统计学、电工学和神经生理学等等不同方面来探索它；在这样的领域里，每一个简单的概念从各方面得到不同的名称；在这样的领域里，一些重要的工作

◀剑桥大学圣约翰学院是剑桥大学第二大学院，学院的创办人是王太后玛格丽特·博福特女士。

被各方面重复地做了三四遍;可是却有另一些重要工作,它们在一个领域里由于得不到结果而拖延下来,但在邻近的领域里却早已成为古典的工作。

正是这些科学的边缘区域,给有修养的研究者提供了最丰富的机会。同时这些边缘区域也是最最不能用集体攻击和劳动分工这种公认的方法来达到目的的。如果一个生理学问题的困难实质上是数学的困难,那么,十个不懂数学的生理学家的研究成绩会和一个不懂数学的生理学家的研究成绩完全一样,不会更多。如果一个不懂数学的生理学家和一个不懂生理学的数学家合作,那么,这个人不会用那个人所能接收的术语表达自己的问题,那个人也不能用这个人所懂得的任何形式来作出自己的回答。罗森勃吕特博士一直坚持主张,到科学地图上的这些空白地区去做适当的查勘工作,只能由这样一群科学家来担任,他们每人都是自己领域中的专家,但是每人对他的邻近的领域都有十分正确和熟练的知识;大家都习于共同工作,互相熟悉对方思想习惯,并且能在同事们还没有以完整的形式表达出自己的新想法的时候就理解这种新想法的意义。数学家不需要有领导一个生理学实验的本领,但却需要有了解一个生理学实验、批判一个实验和建议别人去进行一个实验的本领。生理学家不需要有证明某一个数学定理的本领,但是必须能够了解数学定理中的生理学意义,能够告诉数学家他应当去寻找什么东西。我们多年来梦想着集合这样一批自由的科学家,在这样一块科学处女地上共同工作。他们结合在一起,并不像一群下属围绕着一个司令官,而是由于那种要想理解这整个区域和互相取长补短的愿望,更正确地说,由于这样一种精神上的需要。

远在我们选定共同研究的领域和各自分担的部分之前,我们在这些问题上的观点就已经一致了。走上这新的一步的决定性因素是战争。很久以来,我就知道,一旦国家有事,我的作用将主要地决定于两件事情:同布什博士所拟订的计算机研究计划进行密切接触,我同李郁荣博士关于电网络设计工作的合作。事实上,这两件事情后来都证明了是重要的。1940 年夏天,我把大部分注意力转向发展计算机来解答偏微分方程。我对于这个问题早就有兴趣,并且相信,和布什博士用他的微分分析机处理得很好的常微分方程的情形不同。这里的主要问题是多变数函数的表示问题。同时我还相信,电视中所用的扫描过程给出了这个问题的答案,而且,事实上电视不止是一种独立的工业,它作为一种新的技术而加以引用就注定了要对工程技术发挥更大的用处。

显然,同常微分方程问题相比,任何扫描过程都必须大大增加所要处理数据的数目。为了要在合理的时间以内得出合理的计算结果,必须使基本运算过程的速度达到极大,并且要避免用那些本性缓慢的步骤来打断这些过程的连续进行。同时还必须使单个过程的精确度很高,以免由于基本运算过程的大量重复使得积累起来的误差大到断送了全部精确性的地步。因此我提出了下列建议:

1)在计算机中心部分,加法和乘法装置应当是数字式的,如同通常的加法机一样,而不是基于量度的,如同布什微分分析机那样;

2)这些实质上是开关装置的机件应当由电子管来做,而不要由齿轮或机械替续器来做,以便保证更快速的动作;

3)根据贝尔电话研究所的现有装置所采用的方针,加法和乘法采用二进位制比起采用十进位制来,在装置上大概会更为经济些;

4）全部运算序列要在机器上自动进行，从把数据放进机器的时候起到最后把结果拿出来为止，中间应该没有人的干预；为此所需的一切逻辑判断都必须由机器自身作出；

5）机器中要包含一种用来储藏数据的装置，这个装置要迅速地把数据记录下来，并且把数据牢固地保存住，直到清除掉为止，读出数据要迅速，清除数据也要迅速，而且又要能够立刻用来储藏新的材料。

这些建议，连同关于如何实现这些建议的初步意见都送交布什博士，以备在战争中可能有用处。在战争准备阶段，这些建议似乎不配获得立刻进行研究的那种优先待遇。虽然如此，它们还是代表了那些体现在现代快速计算机中的观念。这些概念在当时思潮的精神之中都已经有了，我丝毫没有想到要宣布诸如我个人对于引进这些概念的贡献之类的事情。尽管如此，我的这些想法被证明是有用的，我的希望也就是要使我这个备忘录能对工程界普及这些概念发生若干作用，无论如何，我们将要在本书的正文中看到，这都是一些与研究神经系统有关的有趣的观念。

这件工作就这样摆到桌子上来了，虽然这些想法是有用的，却没有引导罗森勃吕特博士和我来立即着手加以研究。我们的实际合作是由于另一个计划引起来的，这个计划也是为了上次战争的目的而采取的。在战争初期，德国的空军优势和英国的防御地位使许多科学家的注意力转向改进防空武器的工作。甚至在战争以前就已经十分清楚，飞机的高速度使得所有古老的火力瞄准方法都变得陈旧无用了，必须使控制装置能够进行全部必需的计算。飞机和从前遇到过的所有的射击目标不一样，它的速度比用来击落它的炮弹的速度小不了很多，这个情况带来了很大困难。因此，十分重要的是，射出炮弹时，并不是要朝着射击目标，而是要使投射物和射击目标在未来的某个时刻同时到达空间的某处。因此，我们必须寻找到某种预测飞机的未来位置的方法。

最简单的方法就是把飞机当时的航线沿着一条直线外推。有许多理由推荐这个方法。飞机在飞行中急转和拐弯越多，它的有效速度就越小，它用来完成飞行任务的时间就越少，它留在危险区域的时间就越长。如果其他的条件都相等，飞机就要尽可能地沿直线飞行。可是从第一声高射炮打响以后起，条件不相等了，飞行员就可能飞曲线，翻筋斗，或者用其他方式采取逃避的动作。

如果这种动作飞行员能够完全随意进行，而且飞行员能很聪明地运用他的机会，如同一个优秀的扑克专家那样，那么，他就有足够多的机会在炮弹到达以前来掩饰他所希望到达的位置，使我们不能很准确地计算到射中它的机会，除非我们运用耗费很大的密集防御炮火。可是情况不是这样，飞行员并没有按照自己的意愿来操纵飞机的完全自由。只说一件事情：他是在一架高速飞行着的飞机之中，任何过于急剧地偏离原来航线的动作都会产生极大的加速度，以致使他失去知觉或使飞机解体。再有他只能用转动飞机的操纵面的方法来操纵飞机，而转变到新的飞行状态需要一段短的时间。即使操纵面转到新位置，仅仅能改变飞机的加速度，而这种加速度的改变要产生最后效果还必须先转为速度的改变，然后再转为位置的改变。此外，一个飞行员在紧张的战斗状态下很难进行任何十分复杂和自如的随意活动，一般总是习惯于按照他所熟练的活动式样动作。

所有这些都使得飞行的曲线预测问题的研究值得进行，不管这个研究的结果会证明

实际使用一种带有这种曲线预测的控制装置是有利的还是不利的。预测一条曲线的未来就是对曲线的过去进行某种运算。真正的预测算符不能用任何可以制造的装置来实现。但是却有某些算符能对它作一定的模拟，而且可以用我们所能制造的装置加以实现。我向麻省理工学院的萨美尔·卡德威尔教授建议，认为这些算符是值得试验一番的，他立即建议我们用布什的微分分析机来试验，把它当做我们所需要的火力控制装置的现成模型。我们这样做了，其结果将在这本书的正文里讨论到。无论如何，结果我发现自己已经参加到一个战争的研究题目中来，在这个研究计划里，朱林·毕格罗和我合伙，研究着预测理论和实现这个理论的装置的结构问题。

可以看出，我已经是第二次从事研究一种用来代替人类特殊功能的机械电学系统的工作了——第一次是实现复杂的计算，第二次是预测未来。在预测未来的研究中，我们不应该回避讨论怎样来执行某些人类功能的问题。在某些火力控制装置中，的确，开始进行瞄准的第一个脉冲是直接由雷达发出的，但是，更为通常的情况是，在火力控制系统中有一个高射炮瞄准手或一个高射炮调度手，或者两个人配合起来，他们作为这个控制系统的一个重要部分而动作。了解他们的特性以便从数学上把他们同他们所操纵的机器结合起来，是很重要的。此外，他们的射击目标，即飞机，也是由人来操纵的，我们正是希望知道它的动作特征。

毕格罗先生和我得出了这样的结论：随意活动[①]中的一个极端重要的因素就是控制工程师们所谓的反馈作用。我将用专门的几章来相当详尽地讨论这个问题。在这里只需说一下，当我们希望按照一个给定的式样来运动的时候，给定的式样和实际完成的运动之间的差异，被用做新的输入来调节这个运动，使之更接近于给定的式样。举一个例子，船舶上有一类操舵机，它将驾驶盘的转动，作用到一个与舵柄联结的装置上，通过这个装置调节操舵机的一些气门，使得舵柄朝着把这些气门关闭的方向转动。舵柄这样转动后，就使气门调节装置的另一端回到正中的位置，这样驾驶盘的角位置就再现为舵柄的角位置。显然，任何妨碍舵柄运动的摩擦力或其他阻碍力，都会增加进入某一边气门的蒸汽量，而减少进入另一边气门的蒸汽量，这样就增加了使得舵柄到达所要求的位置上去的转矩。这样，这个反馈系统就使得操舵机的动作相对地独立于其荷载。

另一方面，在有时间延滞等等的条件下，一个过于粗鲁的反馈会使船舵越位，并且跟着还会有一个来自另一方向的反馈，使船舵越位得更厉害，直到驾驶机构发生强烈的摆动或振动(hunting)以至完全毁坏为止。在麦考尔所写的那类书[②]里，我们可以找到，关于反馈起有利作用和起破坏作用的非常详尽的讨论。反馈现象是一种我们已经从量的方面非常透彻地了解了的现象。

现在，假定我捡起一支铅笔。为了去捡，我必须运动某些肌肉。除了少数解剖学专家外，我们大家都不知道这是哪些肌肉；而且即使在解剖学家中间，也未必有人能够有意识地用连续地收缩每一条有关的肌肉的办法来实现这一动作。相反，我们只是要去捡起铅笔。我们一旦决定了这一点，我们的动作就朝着这样的方向进行，粗略地说，就是使表

① 随意活动：生理学上常使用的名词，指经过大脑皮层反射的、有意识的活动。——汉译者注

② MacColl, L. A., Fundamental Theory of Servomechanisms, Van Nostrand, New York, 1946.

示铅笔尚未被捡起的量逐渐减少。这一部分运动并不完全是有意识的。

要按这样的方式来完成一个动作，必须将有关每一瞬时我们尚未捡起铅笔的量的报告送到神经系统，不论是有意识的或无意识的。如果我们用眼睛看着铅笔，这个报告可能就是视觉的，至少部分是视觉的，但是这种报告更一般的是运动感觉的，或者用流行的术语说，是本体感受的。如果我们失去了本体感受的感觉，而又没有用视觉或者其他的感觉来替代，那么我们就不能够完成捡起铅笔的动作，从而发现自己处在所谓运动失调的状态。这种类型的运动失调在叫做脊髓痨（或称为运动性共济失调病）的中枢神经系统梅毒病中，是十分常见的；在这种病中，由脊髓神经来传达的运动感觉或多或少受到损坏。

然而，一个过度的反馈妨碍有组织的活动的严重程度，似乎和一个不足的反馈所造成的一样。毕格罗先生和我估计到这种可能性，向罗森勃吕特博士提出了一种特殊的问题。有没有任何一种病理条件，在这种病理条件下，病人在试图去实现像捡铅笔那样的随意动作时，超过了目的物，然后发生了一种不能控制的摆动？罗森勃吕特博士立即回答我们说，确有这样一种大家熟知的情况，它叫做目的震颤，常常因小脑受伤而引起。

这样，我们就找到了一个极端重要的论据来支持我们关于至少是某一些随意活动的性质的假说。应当指出，我们的观点比神经生理学家们中间流行的观点高明得多。中枢神经系统不再是从感觉接收输入又把它发射给肌肉的一个独立自足的器官。相反，它的某些最具有特征性的活动，只有把它当做一个从神经系统出发进入肌肉，然后通过感官（不论是本体感受器官或者是特殊感觉器官）再进入神经系统的环形过程，才能理解。这在我们看来，是标志着神经生理学研究中的一个新的阶段，这一部分神经生理学不仅涉及神经和突触的基本过程，而且涉及神经系统作为一个整体的活动。

我们三个人觉得这个新观点值得写成一篇论文，我们就写出来并且发表了[①]。罗森勃吕特博士和我预见到这篇论文只能够是一个宏大的实验工作计划的开头，我们想，如果我们的建立一个介乎各门科学之间的科学部门的计划得以实现，这个题目就会成为我们研究活动的几乎是理想的中心。

根据通信工程的知识水平，毕格罗先生和我已经清楚地知道，控制工程的问题和通信工程的问题是不能区分开来的，而且，这些问题的关键并不是环绕着电工技术，而是环绕着更为基本的消息概念，不论这消息是由电的、机械的或是神经的方式传递的。消息是分布在时间上的可量事件的离散的或连续的序列——确切地说，就是统计学家的所谓时间序列。预测一个消息的未来，就是用某种算符去运算这个消息的过去，不管这个算符是由一个数学计算的公式实现的，还是由一个机械装置或电的装置实现的。在这方面，我们发现，我们最初设想的理想的预测机构，遇到了由两类具有对抗性质的误差所引起的困难。我们最初设计的预测装置能够用来预测一个特别光滑的曲线到任何所要求的近似程度，可是，这种精细程度常常是靠提高仪器的灵敏度得来的。这种装置对于光滑波越是适用，它越是容易被离开光滑性的微小偏差引起振荡，而等待这种振荡消失所

① Rosenblueth, A., N. Wiener & J. Bigelow, "Behavior, Purpose & Teleology", Philosophy of Science, Vol. 10, pp. 18-24(1943).

要的时间也就越长。因此，光滑波的良好预测，看来对比粗糙曲线的最优可能预测，要求更精密更灵敏的装置，而每一特殊场合下所用的特定装置的选择，取决于要加以预测的现象的统计性质。这一对相互影响的误差，与海森伯量子力学中的，用海森伯的测不准原理来描述的测量位置与测量动量的矛盾问题，有某些共同之点。

我们一旦清楚地了解到，最优预测问题的解决仅仅取决于要加以预测的时间序列的统计性质，那就不难把在预测理论中原来认为是困难的东西变成为实际解决预测问题的有效工具。设已知一个时间序列的统计性质，我们就能够推导出用某种技术实现的、具有一定时间超前的预测所产生的均方误差的显函表示式。有了这个公式，我们就能把最优预测问题变成为决定一个特殊算符的问题，这个特殊算符要把一个依存于它的特殊正量降到极小值。这类极小化问题属于数学中一个现成的分支，即变分法，这个分支有一种现成的技术。借助于这种技术，我们能够得到对已知其统计性质的时间序列的未来预测问题的显函最优解，并且还能进一步用一种可以制造的装置从物理上来实现这个解。

我们一旦做到了这一点，就至少给工程设计上的一个问题开辟了全新的局面。一般地说，工程设计与其说是一门科学，不如说是一种艺术。而把这一类问题归结为极小化原理，我们就把这个部门建立在更为科学的基础上。我们发现，这不是一个孤立的事件，而是涉及工程工作的整个领域，在这个领域里，类似的设计问题可以用变分法来解决。

我们用同样的方法研究和解决了其他类似的问题。滤波器设计问题便是其中之一。我们发现，一个消息常常被我们叫做本底噪声的外来干扰混杂了。于是我们面临着一个问题，这就是要用一个算符作用于被混杂了的消息之上，以恢复成原来的消息，或是恢复成具有给定超前的消息，或具有给定滞后的消息。这个算符的最优设计，以及用来实现这个算符的装置的最优设计，取决于消息和噪声的分别的和联合的统计性质。这样，我们便在滤波器的设计工作中，把原来具有经验性的甚至有些偶然性的过程，代之以具有透彻的科学判断的过程。

这样一来，我们就把通信工程变成为一门统计科学，变成为统计力学的一个分支。一个多世纪以来，统计力学的观念的确在浸入科学的每一分支。我们将看到，统计力学在现代物理学中的这种优势地位，对于解释时间的本性具有十分生动的意义。在通信工程的场合，统计因素的意义是直接明了的。信息的传递除非作为二中择一的事件的传递，否则是不可能的。如果只有一个偶然事件拿来传递，那么根本不发消息是最有效而最少麻烦的发送方法。电报机和电话机只有在它们所传递的消息以不完全决定于其过去的方式连续变化的时候才能发挥它们的功能，也只有在这些消息的变化符合某种统计规律的时候才能有效地被设计出来。

为了概括通信工程的这个局面，我们必须发展一个关于信息量的统计理论，在这个理论中，单位信息量就是对具有相等概念的二中择一的事物作单一选择时所传递出去的信息。这个思想差不多在同一个时候由好几位科学家提了出来，其中有统计学家R. A. 费希尔，贝尔电话研究所的仙农博士[①]和作者自己。费希尔研究这个题目的动机来

① 见 Shannon, C. E., Weaver, W., "The mathematical theory of communication", The University of Illinois Press, Urbana, 1949. —— 汉译者注

自古典统计理论；仙农的动机来自信息编码问题；作者本人的动机则来自电滤波器中的噪声与消息问题。附带提一提，我在这方面的某些思想，是从苏联的哥尔莫戈洛夫[1]的早期工作得来的，虽然我的工作的相当大的部分是在我注意到这个苏联学派的工作以前完成的。

信息量的概念非常自然地从属于统计力学的一个古典概念——熵。正如一个系统中的信息量是它的组织化程度的度量，一个系统的熵就是它的无组织程度的度量；这一个正好是那一个的负数。这个观点引导我们产生了许多关于热力学第二定律的考虑，引导我们去研究所谓麦克斯韦妖的可能性问题。这些问题也从关于酶和其他催化剂的研究中独立地产生出来，而关于酶和催化剂的研究主要是为了专门了解有生命的物质的新陈代谢和生殖之类的基本现象。生命的第三种基本现象——应激性则属于通信论的范围，而归入我们刚才讨论过的那一群观念中[2]。

早在四年以前，围绕着罗森勃吕特博士和我的一群科学家就已经认识到有关通信、控制和统计力学的一系列核心问题之间的本质上的统一，不管这些问题是机器中的还是活的机体中的。另一方面，关于这些问题的文献缺乏统一，没有任何共同术语，甚至没有一个称呼这个领域的简单名称等等情况严重地妨碍着我们。经过仔细考虑，我们得到这样的结论：所有现有的术语不是过分偏于这一方面就是过分偏于那一方面，不能符合于这个领域的未来发展；正如科学家们常常碰到的那样，我们被迫至少去创造一个新的希腊术语来填补这个缺口。我们决定把这个关于既是机器中又是动物中的控制和通信理论的整个领域叫做 *Cybernetics*（控制论），这个字我们是从希腊字 κυβερυ ητηζ 或“掌舵人”变来的。在选择这个字时，我们是想用它来纪念关于反馈机构的第一篇重要论文，这是麦克斯韦在1868年[3]发表的一篇关于调速器的文章。而拉丁字调速器（governor）一字是从 κυβερυ ητηζ 讹误引申出来的。我们也想提到这个事实：船舶的操舵机的确是反馈机构的一种最早而且最发达的形式[4]。

虽然控制论这个名词的产生不早于1947年夏天，我们觉得用它来叙述这个领域发展的较早时期仍然是恰当的。大约在1942年前后，这个学科分别在几条战线上发展。开头，毕格罗、罗森勃吕特和维纳合写的论文中的思想由罗森勃吕特博士在1942年在纽约召开的一次会议上加以传播，这个会议是梅氏基金会主办，专门讨论神经系统中枢抑制问题的。参加会议的人中有伊利诺大学医学院的瓦·麦卡洛克博士，他早已同罗森勃吕特博士和我有过接触，他对大脑皮质组织的研究很有兴趣。

---

[1] Колмогоров А.Н.，“Интерполирование и экстралолирование стационарных случайных лоследовательностей”，Изв. АН СССР，сер. Мат.，т. 5，стр. 3 14，1941.

[2] Schrödinger，Erwin，“What is Life?” Cambridge University. Press. Cambridge，Englang，1945.

[3] Maxwell，J. C.，Proc. Roy. Soc.（London），16，270-283(1868).

[4] “控制论”（κυβερυ ητικη）一词并不是新词。它在柏拉图的著作中是常见的。在那里它的本义通常是驾船术，操舵术，但是不止一次变义地用于表示管理人的艺术。（见 Guilbaud G. T.，“La cybernétique”，Press Universitaires de France，Paris，1954，pp. 6-7）。1834年，著名法国物理学家安培同样在研究科学分类问题的时候，按古例把管理国家的科学叫控制论。在这个意义下控制论一词编入19世纪许多著名词典中。安培把控制论与“этнодицеей”（民权的科学），外交术和“政权论”一起都列为政治科学，而且控制论与政权论构成了他的政治一词的本义。——俄译者注

在控制论的历史上反复出现过的一个因素，即数理逻辑的影响，这时也参与进来了，假如我必须为控制论从科学史上挑选一位守护神，那就挑选莱布尼兹。莱布尼兹的哲学集中表现在两个密切联系着的概念上——普遍符号论的概念和推理演算的概念。今日的数学记号和符号逻辑即来源于此。正如算术的演算经历了一个由算盘和桌上计算机到今日的快速计算机的机械化过程，莱布尼兹的推理演算器里就包含着推理机器即理解机的萌芽。诚然，莱布尼兹自己和他的前辈巴斯葛一样，兴趣在于制造计算机。因此，丝毫不必惊讶，推动了数理逻辑发展的同一种智力冲动，同时也推动了思维过程的理想的或实际的机械化。

一个能够办得到的数学证明，是一个可以用有限数目的符号写出的证明。这些符号，事实上，可能会与无限的概念有关，但是，这种关系是我们可以由有限个步骤加起来得到的；如像数学归纳法的情形，在那里我们证明一个依赖于参数 n 的定理当 $n=0$ 时正确，又证明 $n+1$ 的情况可以从 n 的情况中推导出来，于是就证明了对于 n 的所有正值，定理都是正确的。而且我们的推演过程的运算规则必须在数目上是有限的，即使它们因与无限的概念有关而表面上看来不是有限的，但是当这无限概念本身可以用有限项表示出来时，推演过程的运算规则仍然是有限的。简言之，对于像希尔伯特那样的唯名论者和像威衣尔那样的直觉主义者都同样十分明白：数理逻辑理论的发展要遭遇到限制着计算机工作的同样性质的障碍。以后我们将看到，用这个观点甚至能够来解释康德和罗素的悖论。

我自己以前是罗素的学生，受了他很大的影响。仙农博士在麻省理工学院做的博士论文是关于类的古典布尔代数方法在电工开关系统研究中的应用[①]。图灵也许是第一个把机器的逻辑可能性作为一种智力实验来研究的人，他在战争时期作为一个电子学家给英国政府服务，现在是德丁顿国立物理研究室的发展新型计算机计划的负责人。

从数理逻辑的领域跑到控制论方面来的另一个年轻的移民是皮兹。他曾经是卡尔纳普在芝加哥的学生，也曾和拉舍甫斯基教授及其生物物理学学派接触过。顺便提一提，这个学派在吸引有数学头脑的人注意生物科学的问题方面，很有贡献，虽然在我们某些人看来，他们过于强调能和势的问题，过于相信古典物理学的方法，以为这样就能够在研究像神经系统这样的系统时做出尽可能的最好的工作，而这样的系统远不是能够仅仅从能量上加以说明的。

皮兹先生很幸运受到了麦卡洛克的影响，他们俩很早就开始研究关于由突触把神经纤维联合为浑然一体的系统的问题。他们和仙农没有联系，独立地运用了数理逻辑的方法来讨论那些归根结底是开关问题的问题。他们增添了一些在仙农的早期工作中作用并不显著的因素，虽然他们一定受到了图灵思想的启发，即：用时间作为一个参数，考虑

---

① 类的布尔代数——逻辑演算法，因纪念19世纪英国数学家和逻辑学家布尔·热尔德萨而取此名。所提到的仙农的研究在 Trans. AIEE, Vol. 57, 1938, p.713 和 Bell System Tech J, 1949, Vol. 28, No. 1, p.59 的论文中有说明。——俄译者注

到含有环形的网络，考虑到突触的延迟和其他延迟①。

1943年夏天我遇见了波士顿市立医院的莱特文博士。他对有关神经机制的问题很感兴趣。他是皮兹先生②的密友，他曾使我了解了皮兹的工作。他邀请皮兹先生到波士顿来，并把他介绍给罗森勃吕特博士和我。我们欢迎他参加我们的集体。皮兹先生于1943年秋来到麻省理工学院，目的是为了同我一道工作，也为了打好他在研究控制论这门新科学中的数学基础。这门科学那时已经确然诞生，但还没有受洗礼。

这时，皮兹先生已经充分熟悉了数理逻辑和神经生理学，但不曾有过很多接触工程的机会，特别是，他还不熟悉仙农博士的工作，在电子学方面还没有多少经验。当我拿一些现代的真空管给他看，并且给他说明这些真空管正是用来实现他的神经元线路与系统模型的理想方法时，他感到极大的兴趣。从那时起，我们已经清楚地认识到，以替续的开关装置为基础的快速计算机必定会是神经系统中发生的各种问题的几乎合乎理想的模型。神经元兴奋的全或无的性质，完全类似于二进位制中决定数字时的单一选择，这种二进位制我们不止一个人设想过，认为它是计算机设计的最合适的基础。突触无非是这样一种机构，它决定来自别的一些选定元件的输出的特定组合是否将成为足以使下一个元件产生兴奋的刺激，而且这种决定的精确性要类似计算机。解释动物记忆的性质和变化的问题，与机器中的人工记忆的问题也是互相类似的。

这时，计算机的制造已经证明对于战争有很重要的作用，为布什博士始料所不及，制造工作也有好几个中心沿着与我早先的报告所指出的相差无几的路线在进展，哈佛、亚伯丁试射场和宾夕法尼亚大学已经在制造机器，普林斯顿高级研究所和麻省理工学院不久也进入同一个领域。在这个过程中，有一个从机械结构到电结构，从十进位到二进位，从机械替续器到继电器，从由人指导运算到自动指导运算的逐渐的进步；总之，每一个新的机械都比以前的机器更加证明了我送给布什博士的备忘录的正确性。在这方面有兴趣的人们经常来往。我们得到了和同事们交流思想的机会，特别是同哈佛大学的艾肯博士，高级研究所的冯·诺伊曼博士，宾夕法尼亚大学研究ENIAC③和EDVAC④计算机的戈德斯汀博士。只要我们碰在一起，我们就互相细心倾听，不久工程师们的词汇中就渗进了神经生理学家和生理学家的专门名词。

到了进程的这个阶段，冯·诺伊曼博士和我都感到需要召开一次所有对于我们现在叫做控制论的这门科学感兴趣的人全都参加的会议，这个会在1943—1944年之间的冬末在普林斯顿召开了。工程师们、生理学家们和数学家们全都有代表参加。罗森勃吕特

① Turing, A. M., "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem", Proceedings of the London Mathematical Society, Ser. 2, **42**, 230-265(1936).

② McCulloch, W. S. and Pitts, W., "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bull. Math. Biophys., 5, 115-133(1943).

③ ENIAC——Electronic Numerical Integrator and Automatic Calculator，即电子数字积分器和自动计算器。这是美国第一架电子计算机，战争期间由费拉德尔菲亚的宾夕法尼亚大学为美军军械局制造的。1946年2月作了第一次公开表演，以后由在梅里林德的亚伯丁试射场弹道实验室使用。——俄译者注

④ EDVAC——Electronic Discrete Variable Automatic Computer，即离散变数的电子自动计算机，这是宾夕法尼亚大学建造的第二架电子计算机；是由梅里林德的亚伯丁试射场弹道实验室预订的。——俄译者注

博士没有可能来参加，因为他刚刚接收了聘请，去领导墨西哥国立心脏学研究所的生理研究室，但是麦卡洛克博士和洛克菲勒研究所的罗浪特博士代表了生理学家。艾肯博士也不能来参加；可是，戈德斯汀博士是到会的几位计算机设计者之一，而冯·诺伊曼博士、皮兹先生和我则是数学家。生理学家们从他们的观点对控制论问题提出了集体意见，同样地，计算机设计者们也提出了他们的方法和目标。会议后期，大家都明白到，在不同领域的工作者之间的确存在着一个实在的共同思想基础，每一个集体中的人都可以运用已经由别人发展得更为成熟的概念，必须采取一些步骤来获得共同的词汇。

在相当久以前，魏维尔领导的战争研究团体发表了一个文件，这个文件起初是秘密的，后来是半公开的，它包括了毕格罗先生和我关于预测器和滤波器的工作[①]。我们发现对于现有的防空火力的条件，曲线预测的特殊装置的设计并没有被证明是优越的，但是其原理却被证明是正确的和实用的，并且被政府用于解决平滑化和与之有关的若干领域的问题。特别是，从我们所研究的变分法问题归结出来的这类积分方程，也出现在波导问题和其他应用数学方面看来有兴趣的问题之中。于是，到了战争结束时预测理论的观念和通信工程统计处理的观念已经为美国和英国的大部分统计学家和通信工程师所熟悉了。人们也注意到了那份政府文件（现在已经绝版），以及列文生、华尔曼、丹尼尔、菲利浦斯和其他等人为了填补这个空白所写[②]的相当数量的说明性文章。我自己还有一篇写了几年的数学方面的说明性的长文，把我所完成的工作永久地记载下来。但是由于一些并不完全由我控制的情况，这篇文章未能迅速出版。直到最后，美国数学会和数理统计研究所 1947 年春在纽约召开了一次联席会议专门从一种密切接近控制论的观点来研究随机过程，我才把这个已写成的手稿交给伊利诺艾斯大学的杜蒲教授，换用了他的符号，并根据他的意见列为美国数学会的数学概览丛书之一[③]。我已经把我的一部分工作在麻省理工学院数学系 1945 年夏的一个讲座课程上宣读过。以后，我从前的学生和同事李郁荣博士[④]从中国回来了。1947 年秋他在麻省理工学院电工系开了一门关于滤波器及其类似装置的新设计方法的课程，并且计划把这些讲授材料整理成一本书。与此同时，那份绝版的政府文件又重印了[⑤]。

我已经说过，罗森勃吕特博士大约在 1944 年初回到墨西哥。1945 年春，我接到墨西哥数学会要我参加那年 6 月在瓜达拉哈拉召开的一次会议的邀请。这次邀请是得到科学研究鼓励和协调委员会的赞同的。这个机构的主持人便是我前面提到过的瓦拉尔塔先生。罗森勃吕特博士邀请我去共同进行一些研究工作。国立心脏学研究所及其所长

---

① 维纳在另一书中提到，这份军事报告是 1942 年 2 月公布的。——俄译者注

② Levinson, I. Math. and Physics (M. I. T.) 1947.

③ 后来编入杜蒲所写的“随机过程”一书中（Doob, J. L., “Stochastic Processes”, Wiley-Chapman & Hail, New York London, 1953. 有俄译本：Дуб Дж. Л., Вероятностый процессы М., ИЛ, 1956）。在该书序言中杜蒲指出有关线性预测的第十二章是在维纳的帮助下写成的。——俄译者注

④ Lee, Y. W. (李郁荣) I. Math. and Physics (M. I. T.), 1932.

⑤ 维纳此处所指的是他的“平稳时间序列的外推，内插和平滑化”一书的结论，“Extrapolation, Interpolation and Smothing of Stationary Time Series”, Technology Press of M. I. T. ——John Wiley & Son, New York——Chapman & Hall, London, 1949. 在此书的序言中维纳提到苏联数学家 A. H. 哥尔莫戈洛夫和 П. A. 科佐廖叶娃的工作。——俄译者注

夏伟士博士盛情地款待了我。

我那时在墨西哥逗留了约十个星期。罗森勃吕特博士和我决定继续研究我们曾经和堪农博士讨论过的那条研究线索。堪农有一次在访问罗森勃吕特的时候，和他谈到过这个问题。可惜，那是一次最后的会晤。这件工作牵涉到癫痫的强直性收缩、阵挛性收缩和时相性收缩与心脏的强直性痉挛、搏动和纤维性颤动之间的关系。我们觉得心肌组织是一种应激性组织，它和神经组织一样，是可以用来研究传导机制的，不仅如此，心肌纤维的吻合与交叉较之神经突触问题是一种比较简单的现象。我们也深深感谢夏伟士博士的无条件厚待；虽然这个研究所从来没有限制罗森勃吕特博士只能研究心脏的规定，我们还是乐意能有机会来为这个所的主要任务效劳。

我们的研究采取了两个方向：二维或多维均匀传导介质中的传导性与潜藏性现象的研究和传导纤维的混乱不定网络的传导性质的统计研究。前者引导我们得到心脏扑动的初步理论，后者导致对纤维性颤动的某种可能的理解。我们把这两个方向的工作写成了一篇论文并且发表了①，虽然在这两个方面，我们的最初结果还需要再作大量的校正与补充。关于扑动的工作由麻省理工学院的塞尔弗烈兹先生继续做下去。而心肌网络中所用的统计技术也被皮兹先生推广到处理神经元网络的问题，皮兹这时已经是领取古根海姆基金会的奖学金的研究生。实验工作由罗森勃吕特博士在国立心脏学研究所和墨西哥陆军医学院的拉莫司博士的协助下继续进行。

在墨西哥数学会的瓜达拉哈拉会议上，罗森勃吕特博士和我报告了我们的一些研究结果。我们已经得到这样的结论：我们早先的合作计划已经证明是实际可行的。我们十分幸运能有机会把我们的结果报告给这么多的听众。1946年春天，麦卡洛克博士与梅氏基金会商定在纽约首次召开一系列专门讨论反馈问题的会议。这些会议按照传统的方式召开，是由弗莱蒙·司密斯博士极为有效地加以筹划的，他代表基金会来组织这些会议。会议集合了一个规模适度的（不超过20人）在各个有关领域中的工作者的集体，他们一连两天在一起，一天到晚就是非正式地宣读论文、讨论、吃饭，毫不停歇，直到他们消除了相互的分歧，并且能够更好地顺着同一路线去思索为止。会议的核心就是1944年在普林斯顿聚会过的那个集体，但是麦卡洛克和弗莱蒙·司密斯博士正确地看到了这个主题在心理学和社会学方面的运用，因此又邀请了一些著名的心理学家，社会学家和人类学家参加到这个集体中来。把心理学家吸收进来的必要性，从一开头便很明显了。研究神经系统的人不能忘记心理，研究心理的人也不能忘记神经系统。过去大多数心理学实际上不过是特殊感觉器官的生理学，控制论引到心理学中去的观念全都是牵涉到与这些特殊感觉器官相联系的高度特殊化的皮质区域的生理学和解剖学的。从一开始起，我们就预料到，对于格式塔②的感知的问题，也就是关于完形感知的形成问题，将会被证明是属于这种性质的。我们把一个方形认作方形，不管它的位置、大小和指向，其机制是怎样的呢？芝加哥大学的克吕弗教授，已故的麻省理工学院的莱文博士和纽约的爱立克逊

① Wiener, N., Rosenblueth, A., "The Mathematical Formulation of the Problem of Conduction of Impulses in a Network of Connected Excitable Elements, Specifically in Cardine Muscle", *Arch. Inst. Cardiol Méx.*, 16; 205; 265.

② 格式塔(Gestalt)——完形，所谓"完形心理学"的专门名词。——俄译者注

博士这些心理学家帮助了我们来研究这些问题，也把我们的概念对心理学有些什么用处和帮助告诉了心理学家。

至于说到社会学和人类学，十分明显，信息和通信作为组织化机制不但对于个体是重要的而且对于集体也是重要的。对于像蚂蚁这样的社会团体，如果对他们的通信方法没有透彻的研究，是完全不可能理解的。我们很幸运，在这方面得到了希尔达博士的帮助。关于人类组织的类似问题，我们从人类学家柏特逊和米德博士那里得到了帮助；而高级研究所的摩根希吞博士则是我们在属于经济理论的社会组织这个重要领域中的顾问。顺便说一说，他和冯·诺伊曼合写的关于博弈论的非常重要的著作是用同控制论的主题密切有关但又有区别的方法的观点来研究社会组织的一部非常有趣味的著作。[①] 莱文博士等的新的研究工作是关于舆论分析的理论和关于制造舆论的实践问题，诺斯洛普博士则对阐明我们的工作的哲学意义感兴趣。

这还不是我们这个集体的全部名单。我们还把这个集体扩大到包括更多的工程师和数学家如毕格罗和沙威其，更多的神经解剖学家和神经生理学家如冯·波宁和诺意特。我们在 1946 年春天召开的第一次会议上所讲的内容，主要包括参加普林斯顿会议的人宣读的启发性的论文，以及所有到会的人对于这个领域的重要性的一般评价。会议感到，控制论所包含的思想对于与会的人十分重要和有趣，值得以后每隔六个月就继续举行一次；而在举行下一次全体会议之前，应该为那些数学训练较少的人开一次小会，用尽可能简明的语言向他们阐明有关的数学概念的性质。

1946 年夏天，我回到墨西哥，在洛克菲勒基金会的支持和国立心脏学研究所的款待下，继续进行罗森勃吕特博士和我的共同工作。这次我们决定选取一个直接涉及反馈主题的神经问题，看看我们到底能从实验方面做些什么。我们选定猫做实验动物，选定股四头肌作为进行研究的肌肉。我们切断肌附着，把肌肉固定到一个已知张力的杠杆上，然后记录其等长或等张收缩。我们又用了一个示波器来记录肌肉自身中同时发生的电变化。我们主要用猫做实验，先在醚麻醉下截除大脑，然后作脊髓的胸部横切。在许多情况下，还使用了马钱子素以加强反射反应。我们使肌肉载荷到这样的程度，这时，一次轻叩就会使它进入周期性收缩，这在生理学家的语汇中叫做阵挛。我们观察了收缩的式样，注意到了猫的生理条件，肌肉上的载荷，振动的频率，引起振动的基本能级及其振幅。我们试图像分析一个表现出同一振动式样的力学或电学系统那样来分析上述系统。我们运用了，例如，麦考尔讨论伺服系统一书上的方法。这里不是讨论我们的结果的充分意义的地方，这些结果我们正在重作并准备写出来发表。无论如何，下面的说法或是已经成立或者是非常可能成立的：阵挛性振动的频率对于载荷条件的改变，远不如我们所设想的那样灵敏；它几乎完全是由传出神经——肌肉——运动终体——传入神经——中枢突触——传出神经的封闭弧的常数所决定，而不是由其他东西决定的。如果我们把传出神经每秒传送的冲动数作为线性的底，那么，这个线路甚至从一级近似来说也不是一个线性运算器的线路，但是如果我们用冲动数的对数作底，那么这个线路就很接近于线

① 指的是冯·诺伊曼、摩根希吞的《博弈论和经济行为》一书。[Von Neumann J., Morgenstern O. "Theory of Games and Economic Behaviour", Princeton University Press, 1943 (1st ed.); 1947 (2nd ed.)]——俄译者注

性运算器的线路了。这与传出神经刺激的包络线的形状并不近乎正弦波形，而这个曲线的对数却相当近乎正弦波形的事实是相符的；而在具有恒定能级的线性振动系统中，刺激曲线的形状除了那些概率为零的情况以外，都必须是正弦波形的。此外，兴奋和抑制的概念，在性质上更接近于乘法而不是加法。例如，一个完全的抑制等于乘上零，部分的抑制等于乘上一个小量。兴奋与抑制的概念已经用到讨论反射弧上去了[①]。更有意思的是，突触是一个符合记录器，只有在一个很小的总合时间内传入冲动数目超过某一定阈时传出纤维才能被激发。如果这个阈和传入冲动[②]的总数比较起来足够低的话，那么突触机构就起乘上一个概率的作用，因而它只有在一个对数系统里才可能近似地成为一线性的元件。突触机构的这种近似的对数性质肯定是与魏勃-费希纳的感觉强度定理的近似对数性质有联系的，虽然这个定理仅仅是第一级的近似。

最重要之点在于，以对数为底。根据从单个冲动通过神经肌肉弧的各个元件的传导中得到的数据，我们就能够用伺服工程中求一稳定状态被破坏的反馈系统的搜索振动的频率的方法，得出关于阵挛振动的实际周期的很好的近似结果。我们得到每秒约 13.9 次的理论振动值，而观察到的振动频率，变化于 7 到 30 之间，不过一般的变化是保持在 12 到 17 之间的范围内。在此情况下，这种符合是很不错的。

阵挛的频率并不是我们可以观察的唯一重要现象；基础张力还有相对缓慢的变化，而振幅也有更为缓慢的变化。这些现象肯定地绝不是线性的。虽然如此，如果线性振动系统的常数变化得足够缓慢，那么，作为第一级近似，就可以假定常数的变化是无限地缓慢的，而这样在系统振动的每一段时间内，都可以把系统的运动看做是参数不变的线性振动系统的运动。这就是在物理学其他分支中叫做久期微扰的方法。这个方法可以用来研究阵挛的基本能级和振幅的问题。这件工作现在虽然还没有完成，但已经清楚地看出，这个方法既是可能的也是有希望的。还有这样一个强烈的启发：虽然在阵挛时主弧也同步地在动作，因而证明主弧是一个二神经元的弧，这个弧上冲动的增强在一点也许在更多点上仍然是可变的。还有，这种增强的某部分可以为缓慢的多神经元过程所影响，这些过程发生在中枢神经系统中，而中枢神经系统较之对阵挛作首先的同步反应的脊髓连锁说来，是处在更高的地位。这种可变的增强可以受中枢一般程度的活动的影响，受马钱子素或麻醉剂的使用的影响，受去除大脑以及其他许多原因的影响。

罗森勃吕特和我把这些主要研究成果带到了 1946 年秋梅氏基金会主办的会议上以及同时由纽约科学院召开的为了向更多的人宣传控制论观念的一次会议上去。虽然我们为自己的成果感到高兴，并且深信顺着这个方向进行的工作一般是可以实行的，可是我们仍然感到共同工作的时间过于短促，感到我们的工作是在急于发表的过大的压力下完成的，没有作进一步的实验证实。1947 年的夏天和秋天，我们着手寻求这样的证实——它自然可能近乎一种反驳。

洛克菲勒基金会早已应允罗森勃吕特博士给他在国立心脏研究所装备一座新的实

① 墨西哥国立心脏学研究所的关于阵挛的未发表的论文。

② 原文为传入突触（incoming synapse），俄译本改为传入信号（входных сигналов），看来原文可能有误，为与前句连接改译为"传入冲动"。——汉译者注

验室。我们感到现在时机已经成熟，应该联名向负责物理科学部的魏维尔博士和负责医学科学部的莫利森博士请求为我们建立长时间科学合作的基础，以便用更加从容和良好的步伐来实现我们的计划。我们各人的工作机构对这件事都给予了热情的支持。在谈判时麻省理工学院理科部主任哈利逊博士是理工学院方面的首席代表，夏伟士博士则代表国立心脏学研究所。在谈判中确定，联合活动的实验中心应当在心脏学研究所。这是为了避免实验设备的重复，也是为了照顾洛克菲勒基金会在拉丁美洲建立科学中心的强烈愿望。最后定下的计划为期五年，这五年中我每隔一年应当到心脏所去六个月，而罗森勃吕特博士则应在另外的那些年里到理工学院来六个月。在心脏所的六个月用来获得和解释有关控制论的实验数据。而其余年份则用来作更带理论性的研究，特别是给愿意进入这个新的领域的人制订一个训练大纲，这是一个非常困难的问题，因为这个训练大纲，一方面要使他们能够获得必要的关于数学、物理学和工程学的基础，另一方面又要获得生物学、心理学和医学技术的专门知识。

1947 年春麦卡洛克博士和皮兹先生做了一件在控制论方面有很大意义的工作。麦卡洛克博士接收了设计一种帮助盲人用耳代目阅读印刷品的装置的任务。通过光电池的作用来产生各种音调，这类方法是早已有历史的了，这可以用无数方法来实现；困难之点在于要使得只要给出文字的式样，不管文字的大小多么不同，声音的式样却要是一样的。这与形状的知觉，格式塔的知觉的问题十分类似，形状的知觉使人把方形认做方形，不管方形的大小和所朝的方向有多大变化。麦卡洛克博士的机器包括一个对不同大小的印刷字体的选择诵读器。这种选择诵读可以作为一个扫描过程来自动实现。这种扫描能够把一个形象和另一个大小与它不同的标准形象作比较，这就是我在梅氏基金会召开的一次会议上提到过的一种装置。这个选择诵读器的装置图引起了冯·波宁博士的注意，他立刻问道："这是不是一张大脑视觉皮质第四层的图？"受到这个启发后，麦卡洛克博士在皮兹先生的帮助下创造了一个把视觉皮质的解剖学和生理学联系起来的学说。在这个学说中，经过一组变换的扫描的动作，起了重要的作用。这个成果在 1947 年春天梅氏基金会召开的会议和纽约科学院的会议上报告了。最后，这个扫描过程有一个特定的周期时间，它相当于普通电视中的所谓"扫描时间"。关于根据运转一周所必需的相连突触的长度来判断这个周期时间，存在有各种解剖学上的解释。这些解释得出了动作一周所需的完全运转的时间，其数量级约为十分之一秒，而这接近于大脑的所谓"α 律"的周期。最后，根据其他证据，我们已经推测到 α 律视觉产生的根源，在形状知觉过程中很为重要。

1947 年春天，我接到邀请要我参加在法国南锡举行的讨论调和分析问题的数学会议。我接收了邀请。往返途中，我在英国停留了总共三个星期的时间，主要是作为我的老友海登教授的客人。我得到了一个极好的机会去会晤许多研究快速计算机的人，特别是在曼彻斯特和在德丁顿国立物理研究室工作的人，更重要的是和德丁顿的图灵讨论了控制论的基本思想。我也拜访了剑桥的心理研究室，得到了一个很好的机会来讨论巴特拉脱教授及其同事们正在进行的关于牵连到人的控制过程中，人的因素的研究工作。我发觉，对于控制论的兴趣，在英国和在美国一样，也是很大而且很有素养的，他们在工程方面的工作做得很出色，虽然不免受到经费较少的限制。我发现人们对于控制论在各个

方面的可能性有着很大兴趣和了解，海登、勒维和贝尔纳教授认为它是科学和科学的哲学的日程上最紧急的问题。可是在统一目标和把各种研究线索联成一气方面，我却没有看到很多的进展，不像我们在美国做到的那样。

法国南锡的关于调和分析的会议包括了许多篇把统计观念和从通信工程中来的观念联系起来的论文，联系的方式与控制论的观点完全一致。这里我必须特别提出勒兰·拉皮尔和劳埃维的名字。我也看到了数学家、生理学家和物理化学家对于这门学科的浓厚兴趣，特别是关于其热力学的方面，因为这些方面涉及生命自身性质的更一般的问题。在我动身以前，我曾经在波士顿和一位匈牙利生物化学家生特·乔治教授讨论过这个问题，并且发现他的观念和我一致。

我在法国逗留期间，有一个黄昏特别值得在这里提一提，我在麻省理工学院的同事山特兰纳教授把我介绍给赫曼书店的弗里曼，他要求出版我这本书。我特别高兴接受他的约请，因为弗里曼是一个墨西哥人，而这本书的写作以及促成写这本书的大部分研究，都是在墨西哥进行的。

我已经提到，梅氏基金会主办的会议上提出的许多观念隐隐指出了一个工作方向，即是关于社会系统中的通信概念和通信技术的重要性。毫无疑问，社会系统是一个像个体那样的组织，它是由一个通信系统联结在一起的，它也有它的动力学，其中具有反馈性质的循环过程起着重要的作用。在人类学和社会学的一般领域中是如此，在更专门的经济学领域中也是如此；我提到过的冯·诺伊曼和摩根希吞关于博弈论的十分重要的工作，便进入了这个思想领域。在这个基础上，贝德逊和米德两位博士考虑到现在这个混乱时代里社会和经济问题的急迫性，曾经怂恿我用大部分精力去讨论控制论的这一个侧面。

虽然我十分同情他们对于目前局势的迫切性的看法，虽然我十分希望他们和其他有资格的人士来研究这类我将在这本书最末一章讨论到的问题[①]，但我仍然既不能同意他们认为我应该首先注意这个领域的看法，也不能同意他们认为在这方面能够获得相当进展从而对目前的社会病症能够产生多少治疗效果的看法。首先，这是因为影响社会的主要的量并不都是统计的量，就是那些统计的量，它们所凭借的统计游程也过于短暂。把柏塞麦炼钢法使用以前和以后的钢铁工业的经济学总括在一起是没有多大用处的，把产生汽车工业和马来西亚人工种植三叶胶以前和以后的橡胶生产的统计加以比较也是如此。把发明六〇六以前和以后两个时期的性病事件统计在一张表里，也没有任何重要用处，除非用来研究这种药物的效力。要得到一个有用的社会统计，就需要处于基本上稳定的条件下的长久的统计游程，正如精密的光学鉴别需要有大孔径的透镜一样。透镜的有效孔径并不因其名义上的孔径的增大而相应的增大，除非透镜是由非常均匀的材料做成，能使光在透镜不同部分中的延迟与原来设计的理论值不符合的程度比一个波长的一小部分还要小。同样，在变化很多的条件下的长久统计游

① 维纳在《人有人的用处，控制论与社会》一书中也谈到这个问题。(Wiener N., "The Human Use of Human Beings, Cybernetics and Society", Eyre and Spottiswood, London, 1st ed. 1950; 2nd ed., 1954. 有俄译本：Винер Н., "Кибернетика и общество". М., ИЛ. 1958)。——俄译者注

程的益处是有名无实的。因此，人文科学并不是这种新数学技术的很好的试验场所；正如我们将气体统计力学用来研究一个分子大小的事物那样不好，因为我们从大处着眼而加以忽略的涨落，这时却成为最重要的事情了。而且，在缺乏可靠的标准的计算技术的情况下，对于各种社会学、人类学和经济学的量的估计，行家的判断因素是如此重要，以至一个还没有大量经验尚未成为行家的新手简直毫无用武之地。顺便我还要提到，小样品理论的现代工具，一旦越出了只由它自身的特定参数的所决定的范围，而变成为一个新情况下的真正的统计推论时，就不能使我对它有任何信赖，除非它是由这样一个统计学家来运用，他能够清楚地了解到情况的动力学上的主要因素，或者隐约地感到它。

我上面讲到了这样一个领域，在这个领域里，由于了解到我们希望得到的数据不能充分得到，所以我们对控制论的期望肯定地受到了抑制。另外还有两个领域，我极其希望能够借助于控制论的概念获得某些实际的成果，但这个希望的实现还有待于将来的发展。其中之一是断掉的或瘫痪了的肢体的修复术。我们在讨论格式塔时已经看到，通信工程的观念已被麦卡洛克用来研究失去的感觉的替代问题，即制造一种能够帮助盲人用听觉来读书的工具的问题。在这里，麦卡洛克建议的工具不仅能十分明显地代替眼睛的某些功能，而且还能代替视觉皮质的某些功能。在人造肢体方面，也有着获得某些类似成果的明显的可能性。一段肢体的丧失，不仅意味着失去这段肢体对身体的纯粹被动的支持，或者说，失去它作为残肢的机械延伸的价值，以及失去了这段肢体上的肌肉的收缩力，而且也意味着失去了来自这段肢体的皮肤感觉和运动感觉。前两种损失正是现在人造肢体制造者所企图弥补的，后一种损失则远在他们考虑的范围之外。如果是简单的假足，这些感觉并不重要：代替失去肢体的那根棍子本身不能作任何自由动作，残体的运动机构完全足以报告它自己的位置和速度。但病人靠残留的筋肉作用举起一只带有活动膝头和踝骨的假肢向前走时，情况就不同了。他得不到关于肢体位置和运动的足够的报告，这就影响了他在不规则地面上行走时步伐的准确性。看来，给人造脚的骨关节和脚底装上应力计或压力计并没有任何不可克服的困难，这种仪表可用电的方法或其他方法，例如用振动器，把结果记录在完好的皮肤上。现在的人造肢体消除了由截除而来的某些瘫痪，但由运动失调而来的瘫痪则未能消除。如果使用了专门的感受器，则这种运动失调的大部分将同样消失，病人将能学会我们大家在开车时使用的那些反射，他也能用更为准确的步伐行走。我们谈的关于下肢的一切，对于上肢也都能适用，甚至更为适用。神经学书籍读者们全都熟悉的人体模型表明，单独截除拇指所引起的感觉丧失，甚至比截除体关节所引起的感觉丧失要大得多。

我已经设法把这些考虑报告给有关当局，但迄今为止在这方面我还不能获得很多成果。我不知道是不是这些想法已从别的来源提出过，或者人们已经试验过这种想法并发现在技术上是不能实现。如果人们还没有得到一个真正实际可行的结果，他们在不久的将来就会得到的。

现在我们来讨论我相信值得注意的另一点，很久以来我就明白，现代超速计算机在原理上是自动控制装置的理想的中枢神经系统；并且它的输入和输出不是必须采取数字和图样的形式，也可以分别利用像光电池和温度计这样的人造感觉器官的读数，以及马

达或螺线管的运动情况。利用应力计或类似的仪器读出这些运动器官的运动情况，并把它当做人造的运动感觉去报告，去“反馈”给中枢控制系统，这样我们就能够制造出具有几乎是任何精巧程度的性能的人工机器了。在长崎事件和社会公众知道原子弹以前很久，我就认识到我们已面临着一个在为善和作恶两方面都有空前重要性的社会力量。自动工厂、无人管理的装配线已经在望，它的实现只是决定于我们是否愿意使用如同在第二次世界大战中发展雷达技术时所花费过的那样大的力量①。

我已经说过，这个新的发展对于为善与作恶，都有无穷的可能性。例如，只说一件事，它使得巴特勒②所幻想的机器的暗中统治成为最直接、最明显的问题。它给人类以许多新的极为有效的机器奴隶来进行人类的劳动。这种机器劳动最具有奴隶劳动的经济性质，虽然与奴隶劳动不同，它并不包含直接的人身虐待的恶劣后果。可是，任何劳动，只要接收了与奴隶劳动竞争的条件，也就是接收了奴隶劳动的条件，它在本质上就是奴隶劳动。这句话的关键字眼是竞争。由于使用机器而免除了繁重的不愉快的工作的需要，这也许是一件好事，也许不是，我不知道。我们不能用市场上的术语，根据所节约的金钱便断定这些新的潜力是好的；这完全是所谓“第五自由”的公开市场的术语，它已经成为由美国制造商协会和星期六晚邮报所代表的那部分美国舆论的国籍鉴别语。我说美国舆论，因为作为一个美国人，我最了解它，但是商人是不承认国界的。

也许我可以澄清一下目前局势的历史背景。如果我说，第一次工业革命是革“阴暗的魔鬼的磨房”③的命，是人手由于和机器竞争而贬值；如果使用铲和镐的美国掘土工同一台也可以算做掘土工的汽铲竞争，他的工资将低至无可再低，以致不能活下去；那么现在的工业革命便在于人脑的贬值，至少人脑所起的较简单的较具有常规性质的判断作用将要贬值。当然，正如第一次工业革命在某种程度上留下了熟练的木匠，熟练的机器匠，熟练的成衣匠一样，第二次工业革命也会留下熟练科学家和熟练的行政人员。然而假如第二次工业革命已经完成，具有中等学术能力水平或更差一些的人将会没有任何值得别人花钱来买的可以出卖的东西了。

答案自然是要求建立一个以人的价值为基础而不是以买卖为基础的社会。要达到这个社会，我们还需要大量的筹谋和奋斗。如果万事如意，那自然合乎理想，否则，谁知道呢？因此，我感到有责任把我对于这个局势的知识和理解告诉积极关心劳动的条件和前途的那些人——即告诉劳工联合会。

我曾经和产业组织协会的一两个高级人士接触过，他们非常明智而关注地倾听了我的意见。但是无论是我或者他们中的任何个人都不能进一步有所作为。根据他们的意见（这意见和我先前在美国和英国观察和了解的相同）：劳工联合会和劳工运动掌握在一群有很大局限性的人们手中，他们在行会小组活动和工资与工作条件争论的专门问题方

① Fortune, 32, 139-147(October); 163-169(November, 1945)。

② 19世纪英国作家，《爱理翁》(*Erewhon*)和《重游爱理翁》(*Erewhon Revisited*)两书的作者巴特勒曾提及此，在他的书中描写一虚构的爱理翁国家，因为机器害多于利而废除了机器。见 Мортон А. Л.，“英国的乌托邦”(“Английская Утопия”. М. ИЛ. 1956，гл. V，§3)。——俄译者注

③ 此句出自英国艺术家和诗人布列依卡的诗，布列依卡是19世纪初工业革命时的人，他在自己的乌托邦著作中指责工业革命的各种缺点(见 Мортон А. Л. “英国的乌托邦”гл. V §1)。——俄译者注

而有极好的训练，但完全无能参与更大的政治、技术、社会和经济的问题，而这些问题正是牵涉到劳工本身的存在的。造成这种情况的理由很容易看出来；劳工联合会的干部一般都是从紧张的工人生活走到紧张的行政人员生活，没有任何机会获得更广泛的训练；而对于有过这种训练的人，工会生涯一般又不是很有引诱力的；而且很自然，这样的人，工会也不是乐意接收的。

我们这些对于控制论这个新的科学有所贡献的人，因此都处在一个道义的位置上，这个位置，至少是不很安适的。我们促进了一个新的科学的发轫，这门新科学，我已经说过，包含着这样的技术发展，它具有为善和作恶的巨大可能性。我们只能把它交给我们在其中生存的这个世界，而这就是德国贝尔森集中营和广岛的世界。我们甚至无法制止这些新技术的发展。它们属于这个时代。我们中间任何人所能做的最高限度，是制止把这方面的发展交到那些最不负责任和最唯利是图的工程师的手中去。我们最多只能指望广大公众了解目前这项工作的趋势与方向，把我们个人的努力限制在诸如生理学和心理学这样的远离战争和剥削的领域里。我们已经看到，有这样的一些人，他们希望，从控制论得到的对人和社会的更深刻的理解的这一好处，将能预料并胜过控制论对权力集中方面所起的偶然的作用（权力，由于其存在条件本身，常常集中在最鲁莽的人的手中）。我是在 1947 年写这些话的，我不得不说，这是一个非常微小的希望。

作者在这里表示他对皮兹先生、塞尔弗烈兹先生、杜伯先生和韦伯斯特先生的感谢，感谢他们替我校正手稿和准备付印的材料。

于国立心脏学研究所
墨西哥城 1947 年 11 月

第 一 章

牛顿时间和柏格森时间

· I Newtonian and Bergsonian Time ·



中学最后一年，维纳爱上了学校里一个15岁的姑娘，她脸上长着雀斑，曾在学校音乐会上弹过钢琴。维纳比她小四岁，对自己的这种感情不免感到可笑甚至惭愧。但他的确是真心真意的，为了迎合女孩并表达自己的心意，缺少音乐细胞的他居然尝试着为她谱了一首曲子，结果呢，“这首曲子就像许多初次作曲的尝试一样，听起来还不如连续敲击钢琴黑键所发出的声音好听”。

这段恋情就如同这首曲子，没有任何结果。但自那时起，维纳开始体会到自己内心里一股新奇而朦胧的力量，它使维纳急于冲破自身的幼稚状态，去体验一些对他这个年龄来说不应有的快乐。这种心理状况标志着维纳的童年时代即将结束，他开始飞速地走向成熟。



有一首德国儿童都很熟悉的短歌，歌词如下：

"Weisst du, wieviel Sternlein stehen
An dem blauen Himmelszelt?
Weisst du, wieviel Wolken gehen
Weithin über alle Welt?
Gott, der Herr, hat sie gezählet
Dass ihm auch nicht eines fehlet
An der ganzen, grossen Zahl"。

这首短歌的意思是："你知道有多少星星镶嵌在蓝色的天空？你知道有多少云朵飘浮过大地？上帝对它们作过清点，数字虽然巨大，可是一无遗漏。"

这首短歌对于哲学家和科学史家是一个有趣的论题。歌词里并举了天文和气象两门科学；它们的共同点，就是同样都以我们头上的天空作为研究的对象；但除此以外，它们在任何方面都是极其不同的。天文学是最古老的科学，而气象学却是那些刚刚够格的最年轻的科学之一。多少世纪以来，人们就能够预测比较常见的天文现象；但是，要精确地预测明天的天气，一般是不容易的，许多地方的确做得非常粗糙。

回头来看这首短歌。对于歌中提出的第一个问题，答案是：在一定条件下，我们就能够知道星体的数目。这首先因为，除了若干双星和变星稍微具有不确定性外，每颗星都是一个确定的对象，极其便于计算和编目。如果人制的星表(Durchmusterung)——我们这样地来称呼星的目录——没有把某一等级以下的星体包括在星表里的话，那么，在神的灵智中收录的星星一定要多得多，这样的观念对我们来说并不算是太荒诞的。

但是，如果你请气象学家给你一个类似的云表，那他会当面笑话你，或者向你耐心解释说：在气象学的全部语汇中，根本找不到似乎永远就是那样一朵的那种云朵；即便有的话，他既没有办法计算，也没有计算的兴趣。一个有拓扑学偏好的气象学家，也许会把一朵云定义为空间的某种连通区域，在这个区域中，处在固态或液态的水，其容量密度超过了一定值。然而，这个定义对任何人都没有用处，它至多描写了一个极端短暂的状态。气象学家真正关心的是这样一类的统计资料："波士顿，1950 年 1 月 17 日，云量 38%，卷积云"。

诚然，天文学中有一个被称做宇宙气象学的分支，像詹都拉什卡尔(Chandrasekhar)所研究的是银河系、星云、星团和它们的统计规律；但是这个分支在天文学中非常年轻，比气象学自身还要年轻，而且是某种不合乎古典天文学传统的东西。古典天文学，按照传统，除了纯粹分类和编制星表这些工作外，着重研究太阳系，而不是恒星世界。它是太阳系的天文学，它主要是同哥白尼、开普勒、伽利略、牛顿等人的名字联在一起的。近代物理学是由它哺养长大的。

◀剑桥大学国王学院，是剑桥最美丽和经典的建筑。据说二战时希特勒非常喜欢此建筑，计划占领英国后，能进驻此建筑而没有下令对剑桥城轰炸，所以剑桥也可以说是因为此建筑而保存如此完美的。

这实在是一门合乎理想的单纯的科学。在任何一种动力学理论出现以前，甚至远溯到巴比伦时代，人们就已经知道，在过去和未来若干年代中日食都是在可预测的周期中出现的。人们还发现，根据星体的运动可以比任何其他方法更好地测定时间。太阳系中发生的一切事件的模型，都像是一个轮子或几个轮子在转动，这不论是在托勒密的本轮说中，或是哥白尼的轨道说中都是如此，而且在这些学说的任何一种中，未来总是以某种形式重复着过去。天体的音乐是一种巴林觉密(palindrome)①，天文历书顺读和倒读都是一样的。除了初始位置和方向外，顺转和逆转的两个太阳仪之间的运动没有任何差别。最后，当这一切被牛顿归结为一组抽象的公设并推演出一门严格的力学的时候，这种力学的基本定律不因时间变数 t 变为它的负数而改变。

因此，假如把一部行星运动的电影片的放映速度加快，使得我们可以感觉到行星的运动，同时倒转过来放映，那么它还是符合于牛顿力学的一种可能的行星运动状态。但是，假如把一部关于雷暴云中云乱流的电影片倒转过来放映，那么一切都不对头了。应当看到上升气流的地方却看到了下降气流，云气不是在结集而是在疏散，闪电反而出现在云朵发生变化之先，以及无数其他奇怪现象。

天文学和气象学所以这样不同，特别是天文学时间显然是可逆的，而气象学时间显然是不可逆的，其原因在哪里呢？首先，气象学系统是由数目极多而大小几乎相等的质点构成的，其中有些质点彼此有非常紧密耦合的相互关系；而以太阳系为中心的天文系统则情况相反，它只包括数目比较少而大小又极为悬殊的一些质点，这些质点彼此间的联系十分松弛，以致第二次的耦合效应不会影响我们观测的基本情况，而更高次的耦合效应则可以全部略去。行星是在少数几种力支配的条件下运动的，这种孤立的程度比之实验中进行的任何物理实验还要彻底得多。和行星之间的距离相比较，行星乃至太阳差不多就是质点。从它们的弹性形变与塑性形变来看，行星差不多就是刚体，即使不是这样，无论如何，当我们考察它们中心的相对运动的时候，它们的内力是比较不重要的。在行星运动的空间中，几乎完全没有什么阻碍物；在研究行星相互吸引的时候，可以认为它们的质量差不多集中在中心上而且是不变的。万有引力定律和平方反比定律之间的分歧非常之小。我们对太阳系中各个星体的位置、速度和质量在任何时候都是十分清楚的；如果要计算它们的未来和过去的位置，细节上虽然有困难，但原则上是容易的，计算的结果也是正确的。然而，在气象学方面，我们涉及的质点，数目这么多，要准确记录它们的初始位置和初始速度是绝对不可能的；即使真的做出这种记录，也算出它们未来的位置和速度，我们得到的无非是一堆乱七八糟的数字，要想使它有任何用处，还得从根本上重新加以解释。所谓"云"、"温度"、"乱流"等等术语都不是指个别的物理状态，而是指许多可能状态(虽则成为现实的只是其中的一个状态)的分布。如果我们同时记下全世界气象站的全部测量结果，按照牛顿观点去看，它们还是不能提供说明大气实际状况所必需的数据的亿万分之一。它们只能提供和千变万化的大气运动状态相一致的某些常数。最多再提供一些先验的假定，这些假定能够对一系列可能的大气状态提出它们的概率分布，也就是提出它们的测度。运用牛

① palindrome(希腊字)，指词和句子当把它们从后往前读时，仍保持原义，如"комок""por rop"。——俄译者注

顿定律或任何其他因果体系，我们对未来任何时刻所能做的预测只是系统中若干常数的概率分布，甚至这种可预测性还会随着时间的增长而消失。

即使在时间完全可逆的牛顿系统中，当回答概率和预测问题的时候也要发生过去和未来之间不对称的情况，因为这类问题本身就是不对称的。假如我来安排一个物理实验，使得我所考察的物理系统从过去阶段进入现在阶段，我把某些量固定下来，我有理由去假定另一些量具有已知的统计分布，然后我来观测一定时间后各项结果的统计分布。这不是一个能够逆转过来进行的过程。如果要使它能够逆转过来进行，那就必须选出系统的一个适当分布，使系统不受我们的干涉自己就会进入某种统计限界内，同时还必须找到为实现这个分布，在一定时间以前的先决条件。但是，从未知的位置出发而会进入任何严格规定的统计范围中去的系统，就像奇迹一样难找，我们的实验技术当然不能建立在等待和计算奇迹的基础上面。总之，我们是受时间支配的，我们跟未来的关系和我们跟过去的关系并不相同。我们的一切问题都被这种不对称性制约着，我们对这些问题的全部答案也同样受着这种约束。

在谈到天体物理学时间的时候，发生了一个非常有趣的关于时间方向性的天文学问题。在天体物理学中，我们是以一次观测来观察远距离天体的；这种实验按其性质来说似乎不是单向性的。那么根据地球上实验观测而建立起来的单向的热力学为什么会在天体物理学的研究上对我们有那么大的用处呢？答案是有趣的，但是不太简单。我们观测星体是借助于被观测对象发射出来的并被我们知觉到的光、射线或质点的作用。我们的眼睛能够知觉射进来的光，但不能知觉射出去的光，或者说，至少我们不能用一种像知觉射进来的光那样简单而直接的实验来知觉射出去的光。在知觉射进来的光的时候，我们用眼睛或底片来接收。我们接收影像的条件是使眼睛和底片在前一段时候处于隔离状态：我们先使眼睛处于黑暗中，是为了消除正在过去的影像的痕迹；我们要把底片用黑纸包起来，是为了防止漏光。很清楚，只有这样的眼睛和底片对我们才有用处。假如老是只看到已经过去了的影像，那么我们就等于瞎子；假如在使用底片以后才把它用黑纸包起来，在使用之前就把它拿去冲洗，那就没法摄影了。正因为这样，我们才能看到那些向着我们和全宇宙放射光芒的星体；但如果还有一些星体是往相反方向进化的话，它们也会从整个天空吸引辐射，这种吸引，即使吸引的是我们地球的辐射，我们也是无法觉察的，因为我们知道的只是我们的过去，不是我们的未来。因此，我们看得到的这一部分宇宙，就辐射的发射而言，它的过去——未来关系一定和我们的过去——未来关系相一致。我们看到一颗星这件事实就意味着这颗星的热力学和我们的热力学相似。

的确，幻想一个理智动物，其时间方向和我们相反，是一个非常有趣的智力实验。这个动物和我们之间的一切通信都是不可能的。他发出的任何信号到达我们这里的时候，逻辑的顺序改变了：在他看来是结果的部分，在我们看来却是原因。这些原因应该都在我们的经验中出现过，我们很自然地就用它来解释他的信号，并不去设想这是由一个有理智的动物发来的。如果他给我们画一个正方形，我们一定会把他的最后几笔看成是最前的几笔，而且他所画的正方形，在我们看来，就好像是这些笔迹的奇怪的结晶（这总是可以解释清楚的）。这个图形的意义是那么出人意料，就像我们把一个人的面孔看做高

山悬崖了。这种正方形的画法对我们说来成了一种突然的变动，由于这种突然的变动[1]，正方形不存在了。这的确很突然，但用自然定律还是可以作出解释的。我们的对方对我们也会有完全类似的想法。能够和我们通信的任何世界，其时间方向和我们相同。

再来比较一下牛顿天文学和气象学的不同之点：有很多科学处在中间地位，但比较起来，大多数更像气象学。甚至天文学自身，如上所述，也有宇宙气象学这一分支。天文学还包括了乔治·达尔文爵士所研究的极其重要的领域，叫做潮汐进化论。我们曾经讲过，太阳和行星的相对运动可以看做刚体的运动，但是实际情况不完全这样。譬如说，地球几乎是被海洋包围着的。比地球中心近于月球的那一部分水要比那一部分陆地更为强烈地受到月球的吸引，而在另一半球则情况相反。这一比较微小的效应使水形成两个波峰，一个正对月球，一个背对月球。如果地球完全是个液体的球，这两个波峰就会随着月球围绕地球旋转，能量逸散不大，因此它们的位置可以相当精确地保持着正对月球和背对月球。这样，它们就会对月球形成一个拉力，这对月球在天体中的角位置不会起太大的影响，但是，这两个波峰在地球上产生的潮汐要被海岸和白令海与爱尔兰海这一类浅海拉扯住，因而它落后于月球的位置，而产生潮汐的力则是许多杂乱的和逐渐消失的力，它们的性质和气象学上遇到的力非常相似，需要统计地处理。的确，海洋学可以叫做水圈的气象学，这总比叫做大气的气象学好些。

这些摩擦力阻碍着月球绕地球的运行，同时加速了地球的自转。这些力量倾向于使一个月的长度和一天的长度彼此接近起来。我们知道，月球的一天就是地球的一月，同时月球总是差不多以同一面朝着地球的。有人猜想这种情况是古代潮汐进化的结果，那时候，月球含有液体、气体或塑胶体，因而在地球吸引下可以产生潮汐进化，同时在进化的过程中散逸大量的能量。这种潮汐进化的现象不仅限于地球和月球，在一切引力系统中都能观察到一些。在以往年代，潮汐进化现象使太阳系的面貌有过巨大的改变，但在人类的历史阶段中，这种变形和太阳系中行星的"刚体"运动比较起来是微乎其微了。

由此可见，即便在引力天文学中也有逐渐衰减的摩擦过程。没有一门科学完全符合于严格的牛顿式样。生物学研究的现象完全是单向的。生并不恰恰是死的反演；同化（即组织的生成）也不恰恰是异化（即组织的破坏）的反演。细胞的分裂不是按照时间上对称的式样来进行的，由种细胞结合变为受精卵的过程也不是这样，个体是顺着一个时间方向前进的飞箭，种族也同样是从过去进入未来。

古生物学的记录说明了一种确定不移的长期趋势：进化的过程是从简单走向复杂，虽然其中有继续、也有交错。在19世纪中叶，这种趋势对于一切诚实而心胸开阔的科学家说来，已经十分明显了；达尔文和华莱士两人大约在同时把解释这种机制的工作都大大地推进了一步，这不是偶然的。这个步骤就是肯定了以下的事实：不论是从个体或是从种族的观点看，由于各种变异都具有不同程度的生活力，种的个体即使仅仅产生一次

---

[1] 由于这种突然的变动，即由于时间方向与我们相反的那个动物在画正方形，正方形反而不见了。这是因为那个动物那里的"过去"（此时正方形还没有开始画，还是一张白纸）正是我们的"未来"，它的"未来"（此时正方形已经画好）却是我们的过去。因此当那个动物画正方形的时候，从我们的时间顺序看来，先有一张完整的正方形图画，以后却逐步消失了。正像黑板上原有一个用粉笔画好的正方形，我们按画它时相反的笔法顺序，逐步抹去一样。——汉译者注

偶然变异也会或多或少地对该种向一个方向或几个方向进化的路线发生影响。一只没有腿的突变种狗一定会饿死；但是，一只瘦长的、已经在肋骨上长出爬行机构的蜥蜴，如果它有光滑的外形同时又没有妨碍行进的四肢突起的话，那它就会得到更好的生存机会。一个水生动物，无论是鱼类、爬虫类或哺乳类，如果是流线型的、肌肉发达的并且具有用来打水的尾部构造的话，就会游泳得更好；如果它要依靠迅速的行动来猎捕食物的话，那它必须有上述的形体，才能获得生存机会。

达尔文的进化论是这样一种机制，它把或多或少的偶然变异性联合成一种比较固定的模式。达尔文的原理今天仍然有效，虽然我们对于这个原理所依据的机制已经有了更多的知识。孟德尔(Mendel)的工作给了我们一个远比达尔文精确的和不连续的遗传观点，而从德·甫里斯(de Vries)以来，突变的概念已经完全改变了我们对于突变的统计基础的概念。我们研究了染色体的细微的解剖构造，并且确定了基因的染色体上的位置。近代遗传学家人数众多而且才能卓绝。其中如海登(Haldane)等人已经使孟德尔遗传学的统计研究成为研究进化论的有效工具。

我们前面谈过查理·达尔文的儿子乔治·达尔文爵士的潮汐进化论。父子之间的思想联系以及共同选用"进化"这个术语都不是偶然的。在潮汐进化论中，如同在物种起源学说中一样，可以找到一种机制，按照这种机制，潮汐波和水分子的无规则运动这种偶然变异性通过动力学过程表现为单向的发展模式。十分明显，潮汐进化论就是老达尔文的见解在天文学上的应用。

达尔文的第三代，查理爵士是近代量子力学的权威学者之一。这件事也许是偶然的，但还是说明了统计的观念又进一步侵入了牛顿的观念。麦克斯韦-玻尔兹曼——吉布斯这一串名字说明了热力学正逐渐地被归结为统计力学，也就是说，热和温度的现象被归结为这样一些现象：对于这些现象我们用牛顿力学去处理的不是单一的动力学系统，而是用许多动力学系统的统计分布；同时我们的结论也不是针对其中个别的系统，而是针对其中的绝大多数。大约在1900年，人们已经知道在热力学中，特别是在辐射问题方面，有若干严重的错误。普朗克定律表示：以太吸收高频辐射的能力比当时存在的任何力学化的辐射理论所允许的要小得多。普朗克用辐射的准原子理论——量子理论——十分令人满意地解释了这些现象，不过这个理论是和物理学所有其他部分相冲突的。随后玻尔也提出了一个类似于普朗克的 *ad hoc*[①] 原子理论。这样，牛顿和普朗克——玻尔就分别构成了黑格尔二律背反的正命题和反命题。海森伯在1925年发现的统计理论是二者的综合，在这个理论中，吉布斯的统计的牛顿动力学被另一个统计理论所代替，这个理论和牛顿与吉布斯说明宏观现象的统计理论很相似；但是，在海森伯的理论中，现在和过去的数据的完全集合还不足以用来比统计更好地预测未来。因此，应该指出：不仅是牛顿天文学，甚至是牛顿物理学也变成了一幅统计状态的平均结果的图画，因而也成了对一种进化过程的说明。

由牛顿的时间可逆到吉布斯的时间不可逆这个转变是有哲学方面的反响的。柏格森曾经强调指出物理学的时间和进化论与生物学的时间的不同：前者是可逆的，其中没

① 专门适合这种情况的。——俄译者注

有什么新事物出现;后者是不可逆的,其中总是发生着新奇的事物。认为牛顿物理学不是生物学的适当框架,这种见解也许就是活力论和机械论古老的论争中心;虽然这个论争曾经被一种愿望弄得复杂化了,这个愿望就是想用这种或那种形式,至少把灵魂和上帝的痕迹保留下来,以防御唯物论的侵入。结果是,如我们看到的,活力论者做得太过分了。他们不是在生命的要求和物理学的要求之间建立一堵墙,而是建立了一座把物质和生命一股脑儿都圈进去的万里长城。不错,新物理学的物质不同于牛顿物理学的物质,但它离活力论者的拟人论的愿望究竟还远得很。量子理论家的所谓偶然不是奥古斯丁道德学上的自由,泰克(Tyche)作为冷酷无情的女神就跟安南克(Ananke)[①]一样。

每个时代的思想都被反映在那个时代的技术中。古代的工程师是土地测量家、天文学家和航海家;17世纪和18世纪初期的工程师是钟表工人和磨透镜的工人。和古代一样,匠师按照天体的形象去制造工具。一只怀表无非就是一个袖珍太阳仪,它的运动有其必然性,就像天体的运动一样;如果摩擦力和能的逸散在其中起着作用,那么就应该克服这些作用,使时针的运动尽可能地周期化和规律化起来。依照惠更斯和牛顿的方式发展起来的工程学的主要技术成果,就是航海时代的出现,这时人们第一次以相当精确的方法计算出经度,因而远洋贸易不再是碰运气和冒险的行动,而变成一种正常合理的事业。这是重商主义者的工程学。

在商人之后出现的是制造商,在计时器之后出现的是蒸汽机。从纽可门蒸汽机时代差不多到今天,工程学的中心领域是从事原动机的研究。热变成了有用的转动和平动的能量,伦福德、卡诺和焦耳等人补充了牛顿物理学。热力学随后出现了,这是一门时间显然不可逆的科学;虽然这门科学早期形成的思想体系似乎跟牛顿动力学毫不相干,但是,能量守恒理论和以后对卡诺原理的统计解释、对热力学第二定律或能量逸散原理——这个原理指出蒸汽机所能获得的最大效率决定于气缸和冷凝器的工作温度——所做的统计解释,都使得热力学和牛顿动力学融合为同一门科学的统计的和非统计的两个方面了。

如果17世纪和18世纪初叶是钟表的时代,18世纪末叶和19世纪是蒸汽机的时代,那么现在就是通信和控制的时代。电工学上曾经有过一次分裂,德国人把它叫做强电流技术和弱电流技术之间的分裂,我们知道这就是动力工程学和通信工程学的划分。正是这个分裂把过去年代和我们现在生活着的时代区分开来。诚然,通信工程学能够处理任何强度的电流,而通信工程学中机器动作的力量也足够扭转一个笨重的炮塔;它之所以和动力工程学不同,是因为通信工程学的主要目的不是在节约能量,而是要使信号准确地再生。这个信号可以是电键的叩击,它必须由另一端的电报接收器的叩击再生出来;它也可以是通过电话装置来传递和接收的声音;它也可以是驾驶盘的转动,结果改变了舵的角位量。通信工程学是由高斯(Gauss)、惠士通(Wheatstone)和第一批电报家建立起来的。在20世纪中叶第一次横穿大西洋海底的电报工程失败之后,它才由开尔文爵士给予第一次合理的科学论述;从80年代以来,在赋予它以现代形态的工作上,大概亥维塞德贡献最多。在第二次世界大战中,雷达的发明及其应用以及控制防空炮火的迫切

---

① 泰克(希腊语)——机遇的意思;安南克(希腊语)——命定的意思。——俄译者注

任务，把大量有修养的数学家和物理学家都动员到这个领域中来了。自动计算机的神奇也属于这个思想领域，的确，人们在过去从来也没有像今天这样活跃地探究着这个思想领域。

自从得达拉斯(Deadalus)或亚历山大里亚的希罗(Hero of Alexandria)以来，在技术发展的每一阶段上，人们对于技师模仿生命体制造出机器的才能，总是很感兴趣的。这种制造和研究自动机的愿望常常用当代技术表现出来。在巫术时代，泥人高兰(Golem)就是一种奇特而邪恶的想法，布拉格的犹太教的法律师用亵渎上帝圣名的咒语给这个泥像注入了生命。在牛顿时代，自动机就是钟机音乐箱，顶上装着生硬地跳着足尖舞的小雕像。在19世纪，自动机就是那著名的热机，燃烧着易燃的燃料以代替人的肌肉中的糖元。最后，现代的自动机用光电管来开门，或者使枪炮向雷达找到飞机的地方瞄准，或者把微分方程的解计算出来。

希腊时代和魔法时代的自动机都不是现代机器的发展方向，它们似乎对重要的哲学思想也从来没有起过什么作用。钟机自动机的情况就大不同了。这种思想曾经在现代哲学的初期历史中起过很本质、很重要的作用，虽然我们常常没有看到这一点。

首先，笛卡儿把低等动物看成是自动机。这样做是要避免对正统的基督教看法表示怀疑，因为正统的基督教看法认为动物没有可以拯救和惩罚的灵魂。至于这些有生命的自动机究竟怎样活动，据我所知，笛卡儿没有讲过。但是，和这有关的一个重要问题，即人类灵魂(包括感觉和意志这两个方面)与物质环境的关联方式问题，笛卡儿是讲过的，虽然他讲得极其不能令人满意。他把这种关联的位置定在他所知道的大脑中央部位——松果体。至于关联的性质——不论它是否表现为心对物和物对心的直接作用——他是不太清楚的。可能他确实把这种关联的性质看做是双方面的直接作用；但是，他把人类经验作用于外界时的正确性归诸上帝的善良和正直。

归诸上帝的这种作用是不可靠的。假如上帝是完全被动的，那么，很难看出笛卡儿的解释真正说明了什么东西；假如上帝是主动的参与者，那么，上帝的正直除了保证他是我们感觉活动中的主动参与者外，很难看出还有什么意义。这样，与物质现象的因果关系平行的还有一条从上帝的活动产生的因果关系，上帝通过这种活动在我们心中创造出同某种物质状况相对应的经验。这个假定一旦成立，那就很自然地要把我们的意志与其在外界产生的结果相符合同样归诸神的干涉了。这是偶因论者格林克斯(Geulincx)和马勒伯朗士(Malebranche)所追随的道路。斯宾诺莎在很多方面是这个学派的延续者，偶因论的学说在他那里得到了较为合理的形式；他主张心与物的对应就是上帝的两个独立自足的属性的对应。但是，斯宾诺莎总是不用动力学的观点来考虑问题的，因之他对这种对应的机制考虑得很少，甚至没有考虑。

这就是莱布尼兹开始研究以前的局面，但是，莱布尼兹是习惯于用动力学观点去考虑这个问题的，就像斯宾诺莎习惯于用几何学观点去考虑这个问题一样。首先，他用一双对应的元素的连续统——单子——去代替心和物这一双对应的元素。这些单子虽然是按照灵魂的式样来设想的，但其中有很多单子没有达到像完整灵魂那样具有自我意识的程度，它们成为被笛卡儿称做物质的那一部分世界。每个单子，从创始或负无穷的时间到无限遥远的未来，各以完整的因果关系生存在自己的密闭的宇宙中；它们虽然是密

闭的，但由于上帝的预先调和，因而彼此可以对应。莱布尼兹曾经把单子比做上了发条的能够从开天辟地起永恒地保持同一速度的钟表。单子不同于人造的钟表，它们不会产生快慢的差别，这是造物主的神妙完美的手艺所致。

因此，莱布尼兹是按照钟机的模式来考察他所构成的自动机世界的，这对于惠更斯的信徒来说是很自然的事，单子可以互相反映，但这种反映没有使因果关系互相转移。它们实际上就跟八音盒顶上被动地跳着舞的小人那样独立自足，甚至更加独立自足。它们对外界没有真正的影响，而外界也同样地不影响它们。正如莱布尼兹所说的，它们没有窗户。我们所看到的显然有组织的世界只是某种介乎虚幻和奇迹之间的东西。单子乃是牛顿太阳系的缩影。

在19世纪，人们是从另一种角度来研究人造自动机和那些自然自动机，即唯物论者所讲的动物和植物。能量守恒和能量逸散是当时的基本原理。生命体首先是一部热机，它把葡萄糖、糖元或淀粉，脂肪和蛋白质燃烧为二氧化碳、水和尿素，新陈代谢的平衡问题是人们注意的中心；如果有人注意到动物肌肉的工作温度较低而一架具有同样效率的热机的工作温度较高这个矛盾的话，那也就避而不谈，只是用生命体的化学能和热机的热能有所不同的说法来马马虎虎地解释一下。所有的基本概念都和能量有关，而主要是和势能有关。身体的工程学是动力工程学的一个分支。这个观点，直到今天，还在那些喜欢用古典看法来考虑问题的保守的生理学家中间占着优势；像拉舍甫斯基（Rashevsky）及其学派这一批生物物理学家的整个思想倾向证明上述见解仍然是有势力的。

今天，我们认为身体远不是一个守恒系统，它的各个组成部分在这样的环境中工作着：它们在这里所能利用的功率远较我们想象的要大得多。电子管就说明一个带有外部能源的系统（全部能量几乎都被浪费掉了）在完成规定的操作上可以是一个极有效的工具，特别是在低能量级下工作的时候。我们已经开始注意到我们躯体中神经系统的原子——神经元——这样重要的要素，它们是在跟真空管非常相同的条件下工作着，它们所需的很小的功率通过血液循环由外部供给；我们也注意到了记载神经元功能的最本质的簿记不是能量的簿记。总之，对自动机（无论是对金属自动机或是对血肉自动机）的新的研究都是通信工程学的一个分支，它的基本概念就是关于消息、干扰量或“噪声”（一个从电话工程师那里取得的术语）、信息量、编码技术等等的概念。

在这种理论中，我们研究着这样一种自动机，它不仅通过能量流动和新陈代谢，而且通过印象和传入消息的流动以及由传出消息引起的动作的流动和外界有效地联系起来。自动机接收印象的器官相当于人和动物的感觉器官。它们包括光电管和其他光接收器，包括用来接收本身发出的短波长波的雷达系统，包括相当于味觉器官的氢离子势记录器，温度计，各种压力计，放大器，等等。相当于动作器官的可以是电动机、螺线管、热线圈或其他不同性质的工具。在接收器或感官和动作器之间有一系列中介的元件，它们的功用是把传入的印象重新结合起来，以便在动作器中产生所希望的反应。传入中枢控制系统的信息经常也包含着关于动作器自身工作状况的信息。发出这些信息的元件和人体的运动感觉器官和其他本体感觉器官相当，因为我们也有记录关节位置或肌肉收缩率等等的器官。此外，自动机接收到的信息不一定立刻使用，可以被搁置或储存起来以供将来之需，这可以跟记忆相似。最后，在自动机运转的时候，它的操作规则本身会按照过

去通过接收器的数据的情况而多少发生变化，这就像是学习的过程。

我们现在所讲的机器不是唯觉论者的梦想，也不是未来某个时候才能实现的希望。它们已经实现了，恒温器、自动回转罗盘船舶驾驶系统、自动推进导弹——特别是自己寻找目标的导弹、防空炮火的控制系统、自动控制的石油热裂蒸馏器、超速计算机等等都是。它们在战前很久就开始使用了（实在说，非常古老的蒸汽机调速器也应该列在这里头），但是，第二次世界大战的大规模机械化措施才促使它们具有今天的面貌，为了掌握极端危险的原子能可能也需要把这些机器推向更高的发展阶段。目前，不到一个月就出一本所谓控制机械或伺服机械的新书，现在的时代真是伺服机械的时代，就像 19 世纪是蒸汽机的时代而 18 世纪是钟表的时代一样。

总结一下：现代的各种自动机是通过印象的接收和动作的完成和外界联系起来的。它们包括感官、动作器和一个用来把从一处到另一处的传递信息加以联结的相当于神经系统的器官。它们很便于用生理学的术语来描述。因此，用一种理论把它们跟生理学的机制概括在一起并不是什么奇迹。

这些机制和时间的关系需要很细心的研究。当然，输入—输出关系在时间上是一种循序关系，而且具有确定的过去——未来的次序，这些都是清楚的。不够清楚的地方也许就在于灵敏自动机的理论是一个统计的理论。通信工程的机器，根据单独一次输入而产生的动作是不会使人感到兴趣的。这种机器如果要能充分发挥作用，它就必须对全部输入都作出令人满意的动作。这也就是说，对一类从统计上预期要收到的输入做出统计上令人满意的动作。它的理论应该属于吉布斯统计力学的范围，而不应当属于古典牛顿力学的范围。这个问题我们将在专门讨论信息理论的一章中作详细的研究。

因此，近代自动机跟生命体一样，都存在于柏格森的时间中。按照柏格森的观点，我们没有什么理由认为生命体活动的基本方式一定和模拟生命体的人造自动机有所不同。活力论者已经胜利到这样的地步，即使是机械也要符合于活力论的时间结构；但是，如上所述，这个胜利其实是彻底的失败，因为按照任何跟道德、宗教略微有关的观点来看，新的力学跟旧的力学一样地机械。是否应该把这种新观点叫做唯物论观点，这主要是一个讲法的问题。19 世纪物理学所处形势的特征就是物质这个概念远比今天更有势力；“唯物论”这个名词已经差不多变成“机械论”的不严格的同义语了。事实上，机械论者和活力论者全部争论的问题都因提法不当而被抛到垃圾箱里去了。


WELLESLEY
COLLEGE

第二章

群和统计力学

· II Groups and Statistical Mechanics ·



一天，维纳阅读了《脊椎动物比较解剖学》后，请求生物系教授允许他做一次解剖实验。可是教授迟迟没有答应。维纳忍不住了，于是悄悄约了两位同学，向善良的看门老头要了一只做实验的豚鼠，偷偷带进实验室。他想按照解剖学课本上提到的那样，做一次动脉结扎和新的缝合，使血液重新循环的有趣试验。他手忙脚乱地扎住豚鼠大腿骨的一条动脉，开始做“手术”了。但是，由于他的思想远远跑在动作的前面，显得行动迟钝极了。他忘记了使用麻药，做手术时又没有正确地将动脉和连在一起的静脉以及神经分开，以致手术还没做完，这只可怜的豚鼠就活活地痛死了。教授闻讯后怒气冲冲地闯进实验室厉声问：“是谁想出这种不人道的主意的？”因为，当时这种活体解剖是被视做犯罪行为的，如果声张出去，很可能实验室要被取消解剖特权。



大约在20世纪初，有两位科学家，一位在美国，一位在法国，要是说他们稍微有一点知道对方的存在，他们的研究方向表面上却是彼此完全无关的。住在纽哈文(New Haven)的吉布斯(W. Gibbs)发展了他在统计力学方面的新观点。住在巴黎的勒贝格(H. Lebesgue)由于发现了一个用来研究三角级数的新的更有效的积分理论，而和他的老师波瑞耳(E. Borel)齐名。这两位发现者，就他们都是理论工作者而不是实验工作者这点说，是想象的；但除此以外，他们对科学的整个态度，却完全相反。

吉布斯虽然是数学家，但总认为数学是为物理学服务的。勒贝格则完全是个典型的分析学家，对于数学严密性的极其严格的现代标准，他是一个有才能的代表者；他又是一位著作家，据我所知，他的著作中甚至连一个直接有关物理学问题或方法方面的例子也没有。然而，他们两人的著作形成了一个整体，其中，吉布斯提出的问题没有在他自己的著作中找到答案，而是在勒贝格的著作中找到答案的。

吉布斯的基本思想是：按照牛顿动力学的本来面目，我们处理的是一个具有已知初始速度和初始动量的单个系统，这系统在一定的力系作用下，按照把力和加速度联系起来的牛顿定律而变化。但对于绝大多数场合，我们无法知道所有的初始速度和初始动量。可是，如果假定系统的这些没有完全知道的位置和动量具有一定的初始分布，那么，我们就可以完全用牛顿的方法来决定系统在以后任一时刻的动量和位置的分布。这样，我们就能就这些分布作出推论，这些推论中有一些具有这样的判断的性质：系统在将来出现某些特征的概率为1，或出现其他某些特征的概率为零。

概率为1和概率为零这两个概念的含义，是完全确定和完全不可能，但它们还有更多的意义，假如我用具有点的尺度的枪弹射击一个靶，我命中靶上任一特定点的机会一般说是零，虽然命中它并不是不可能；的确，当我每次射击的时候，我一定会命中某一特定点，而这本来是一个概率为零的事件。因此，我总会命中某一点这个概率为1的事件，可以是由许多概率为零的事件集合构成的。

但是，在吉布斯的统计力学方法中，采用了如下一种手续，不过这个手续是隐含采用的，吉布斯本人从来没有清楚地意识到：这就是把一个复杂的偶然事件分解成一个由许多比较局部的偶然事件构成的无限序列——第一个、第二个、第三个，等等，它们各有一个已知的概率；而且，这些构成无限序列的比较局部的偶然事件的概率之和，就表示这较大的偶然事件的概率。因此，我们虽然不能在所有可能设想的场合都用概率求和来得到总事件的概率——因为任意个零之和仍为零，但如果总事件中各个偶然事件能够按照第一、第二、第三，等等排列起来构成一个序列，其中每一项都有一确定的能用一一正整数

① 这个"浓度"的原语是multiplicity，在集合论的术语上，使用势(power)这个字。两个集合之间如果有一对一的对应关系，它们便有相同的势。具有与自然数集合相同的势的集合便是可能的势。在这里表现为可以"排列成1，2，3，…"。——译者注

◀剑桥的"牛顿数学桥"，因牛顿设计而得名。此桥牛顿建造时没有用一根铁钉，后来有些剑桥学生把它拆了研究，结果再也无法稳定安装回去，现在的桥因此多了许多铁钉。

标示的位置，我们就能够对全部概率求和。

要区别这两种情形，必须对事件集合的性质作相当精细的考虑，吉布斯虽然是个很权威的数学家，但还不够细致。能不能有一种无限集，它和其他的无限集，例如正整数集，在浓度[①]上有着本质的差别呢？这个问题在19世纪末由康德解决了，答案是："有的"。如果考虑0到1之间所有不同的分数，无论是有理数或无理数，我们就会看出，它们是不能按照一、二、三……的次序排列起来的——虽然很奇怪的是，所有的有理分数能够这样来排列。因此，吉布斯的统计力学要求对这两种情形加以区别[①]，显然不是不可能的事。勒贝格对吉布斯理论所作的贡献，就在于他证明了，统计力学关于概率为零偶然事件的内在要求，以及关于对这些偶然事件的概率求和的内在要求，实际上是能够实现的；并且他证明了，吉布斯理论本身并不包含任何矛盾。

但是，勒贝格的工作并不是直接基于统计力学的需要，而是基于一个看来完全不同的理论，即三角级数理论的需要。谈到三角级数理论，这就要回溯到18世纪的波和振动的物理学，回溯到当时激烈争论的一个问题：线性力学系统的任何运动是否普遍地都能由系统的简单振动综合而成；所谓简单振动，就是指这样的振动，其所经历的时间不过就是它对平衡状态偏离的值乘上一个仅仅与时间有关而与位置无关的或正或负的量。这样，一个函数就表示成一个级数和。级数中各个系数则表示成这函数与一已知的权函数乘积的平均值。整个理论在于，级数的平均值可以用级数中各个项的平均值表示出来。另一方面，我们注意，一个在0到A的区间中为1而在A到1的区间中为0的量，其平均值为A，可以把它看做已知落在0到1之间的不定点应当落在0到A区间中的概率。换句话说，级数平均所需要的理论和为了能充分讨论事件的无限序列的复合概率而需要的理论，有着非常密切的关系。这就是为什么勒贝格在解决自己的问题的时候也同时解决了吉布斯的问题的原因。

吉布斯讨论的特殊分布，本身有其动力学上的解释。假设考虑某个有N个自由度的最一般的保守动力学系统，它的位置和速度坐标一共有$2N$个，其中N个叫做广义位置坐标，另外N个叫做广义动量坐标。这些坐标决定一个$2N$维空间，定义着$2N$维体积。在这空间的任意一个区域中，每个点都依据力学定律随时间而流动，这时，每个点的$2N$个坐标的集合改变为另一个由经过时间决定的新的$2N$坐标的集合，但是，虽然这个区域的边界在连续变化，它的$2N$维体积并不改变。因为定义集一般不像定义这些区域那样简单，所以由体积的概念就进一步引出了勒贝格型的测度体系。对于保守动力学系统，它在经受变换时，勒贝格测度保持不变，此外它还有一个数值可以计算的对变换也保持不变的量，这就是能量。如果系统中各个物体仅仅是两两相互作用，在空间中任何固定位置和固定方向上没有外部附加力的作用，那么，系统还有另外两个数值保持不变的量。它们都是矢量，即整个系统的动量和角动量。我们不难消去相应于它们的坐标，使得系统的自由度更少。

对于很特殊的系统，还可以有一些与能量、动量和角动量无关的其他不变量，它们的

① 概率对于可数事件是可以加的，然而对于不可数的势的事件一般是不能加的。在这里势的区别很重要。——日译者注

数值在系统变化的时候也是不改变的。然而我们知道，从十分精确的意义上说，实际上很难找到一种力学系统，它既有依赖于系统初始坐标和动量的其他不变量，又能充分正规地用基于勒贝格测度的积分法加以积分[①]。对于没有其他不变量的系统，我们可以把相应于能量、动量和总角动量的坐标固定起来，而在其余坐标的空间中，由位置和动量坐标所决定的测度本身又定出一种子测度，正像三维空间的测度能够决定二维曲面族中二维曲面的面积一样。例如考虑一个同心球面族，当两个固定球面间的总体积规格化为1时，两个相邻同心球面间的体积的极限就是球面上面积的测度。

假设我们对能量、总动量和总角动量已定的相空间中的那个区域采用这新的测度，并假定系统此外并无其他可测的不变量。令这个限定区域的总测度为常数，或者适当改变单位使这常数为1。因为我们这个测度是由对时间不变的测度得到的，得到的方法也对时间不变，所以它本身也对时间不变。我们称它为相测度，而对它所取的平均则称为相平均。

但是，任何一个随时间变化的量还可以有时间平均。例如，若 $f(t)$ 依赖于 t，那么它对过去的时间平均为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T}^{0} f(t)\,\mathrm{d}t; \tag{2.01}$$

对未来的时间平均为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{0}^{T} f(t)\,\mathrm{d}t. \tag{2.02}$$

在吉布斯的统计力学中，时间平均和相平均两者都有。吉布斯企图证明这两种类型的平均在一定意义上是相同的，这是很高明的想法。就吉布斯想到这两种平均是有关的这个观念说，他完全是正确的；但就他企图用来证明这种关系的方法说，他就整个地毫无挽救地错了。这并不能责备他，因为在他逝世的时候，勒贝格积分的名声才刚刚传入美国。过了15年，它又变成博物馆里的珍品了，唯一的用处只是向年轻的数学家们说明严密性的必要和可能。而且，像奥斯哥德（W. F. Osgood）这样著名的数学家，甚至到他死的时候也没有关心到它[②]。一直到1930年初，柯普曼（Koopman）、冯·诺伊曼（von Neumann）、贝克荷夫（Birkhoff）这一群数学家，才最后建立起了吉布斯统计力学的真正基础[③]。我们下面在研究各态历经理论（ergodic theory）时将看到这些基础是什么。

吉布斯本人曾经想到，对于一个所有的不变量都被作为多余坐标而消去的系统，相空间中所有各点的运动路径几乎都通过这个空间中的全部坐标。他把这个假说叫做各态历经假说，这个名词是由希腊字 εργου（工作）和 οδοζ（路径）来的。但问题首先是，正如普朗切锐耳（Plancherel）和其他一些人指出的，这个假说在任何实际场合都不成立。没有一条可微分的路径能够盖满平面上的一块面积，即使这条路径有无限长。吉布斯的追随者们，也许最后还包括吉布斯本人，都隐约看到了这点，因而他们用准各态历经假说来

① Oxtoby, J. C., and Ulam, S. M., "Measure Preserving Homeomorphisms and Metrical Transitivity". Ann. of Math., Ser. 2, 42, 874-920(1941).

② 虽然如此，奥斯哥德早期的某些工作还是引向勒贝格积分方向的一个重要步骤。

③ Hopf, E., "Ergodentheorie", Ergeb. Math., 5 No. 2, Springer, Berlin (1937).

代替这个假说。准各态历经假说只是说，在时间的进程中，系统通常几乎通过由已知不变量决定的相空间区域上的每一点。证明这个假说并没有什么逻辑上的困难，只不过用它来得到吉布斯的结论显得十分不够罢了，因为它没有涉及系统在每一点近旁所耗费的相对时间。

为了理解各态历经理论的真实意义，除了需要平均和测度这两个对弄清吉布斯理论的意义最为必要的概念以外(这里平均是指在给定的域上，对一个在被测的集上为 1 而在其他各处为零的函数的平均)，我们还需要更详细地分析一下不变量和变换群的概念。我们从吉布斯的矢量分析研究中看到，他对这些概念肯定是熟悉的。然而，可以这样说，吉布斯没有充分估计到它们的哲学价值。和他的同代人亥维塞德一样，吉布斯也是一个物理——数学上的敏感常常超过逻辑上的敏感的科学家，他一般是正确的，但常常不能解释为什么他是正确的，也不能解释他如何能正确。

任何一门科学的建立，都必须以非孤立现象的存在为前提。如果世界是由一个没有理性的上帝统治的，他可以一阵心血来潮地作出一连串的奇迹，那么，在这个世界里，我们就要狼狈不堪地被迫等待每一个新灾难的到来。在《阿丽思漫游奇境记》里的棒球场上，就是这种世界的描绘，在那里，棒球棒是火烈鸟；棒球是慢条斯理地伸张着和自顾自地爬动着的刺猬；球门是纸牌上的士兵，他们也会自动爬起来随便活动活动；而棒球规则是性情暴躁、捉摸不定的心牌皇后的命令。

游戏中的有效规则或物理学上的有用定律的本质，就是它们都能事先予以陈述，而且可以应用到不止一个场合。一个理想的法则，应当能够反映所讨论的系统在其具体环境变化时仍然保持同一的那种性质。在最简单的情形下，这是指对施于系统的变换集保持不变的性质。这样，我们就导致变换、变换群和不变量的概念。

系统的变换表示一种变化，这时系统的每个元变为另一个元。太阳系在时间 t_1 和时间 t_2 之间发生的变化，是各个行星坐标集合的变换。当移动坐标原点或旋转坐标轴发生的行星坐标的类似改变，也是一种变换。当我们根据显微镜的放大作用，试验一个试品发生的标度改变，同样是一种变换。

施行变换 A 以后接着施行变换 B，结果得到另外一个变换，它叫做 B 和 A 的乘积或合成 BA。注意，乘积一般与 A 和 B 的次序有关，例如，若 A 是将坐标 x 变为 y，y 变为 $-x$ 而 z 不改变的变换；B 是将 x 变为 z，z 变为 $-x$ 而 y 不改变的变换；则 BA 将使 x 变为 y，y 变为 $-z$，z 变为 $-x$；而 AB 将使 x 变为 z，y 变为 $-x$，z 变 $-y$。如果 AB 和 BA 是相同的变换，我们就说 A 和 B 是可交换的。

有时，变换 A 不仅能使系统的每个元都变为系统的某一个元，而且每个元都是对某个元施行这个变换的结果，不过这种变换性质不是任何变换都具有的。在这情形下，存在一个唯一的变换 A^{-1}，使得 AA^{-1} 和 $A^{-1}A$ 构成两个很特殊的变换，它们叫做恒等变换 I，这种变换使每个元仍变为自身，我们把 A^{-1} 叫做 A 的逆变换。显然，A 也是 A^{-1} 的逆变换，I 是其自身的逆变换，而 AB 的逆变换是 $B^{-1}A^{-1}$。

有这样一类变换集：属于这个集的每个变换都具有逆变换，其逆变换也属于这个集；属于这个集的任何两个变换的合成，自身也属于这个集。这类变换集叫做变换群。所有沿直线的、平面上的或三维空间中的平移所构成的变换集，都是变换群；特别是，有一种

特殊的变换群，叫做阿贝尔群[1]其中任何两个变换都是可交换的。绕一点的旋转和刚体在空间中的各种运动所构成的变换集，都是非阿贝尔群。

假定我们用一个变换群对规定某个量的各个元作变换。如果群中任何一个变换对所有这些元施行变换后这个量保持不变，我们就叫这个量是一个**群不变量**。群不变量有许多种，其中有两种对我们以后特别重要。

第一种就是所谓的**线性群不变量**，令一阿贝尔群所变换的各个元用 x 来表示；并令 $f(x)$ 是这些元上定义的复值函数，而且具有适当的连续性或可积性。这时，若 Tx 表示变换 T 对 x 作用后得到的元，且 $f(x)$ 是一绝对值为 1 的函数，使得

$$f(Tx) = \alpha(T)f(x) , \tag{2.03}$$

式中 $\alpha(T)$ 是一绝对值为 1 的只依赖于 T 的数，那么，我们就说 $f(x)$ 是群的一个特征标(character)。在稍微广义的意义上说，它也是群不变量。如果 $f(x)$ 和 $g(x)$ 都是群特征标，则 $f(x)g(x)$ 显然同 $[f(x)]^{-1}$ 一样也是群特征标。如果任意一个定义在群上的函数 $h(x)$ 能表示成群特征标的线性组合，即它能写成

$$h(x) = \sum A_k f_k(x) , \tag{2.04}$$

式中 $f_k(x)$ 是群的特征标，$\alpha_k(T)$ 对 $f_k(x)$ 的关系与(2.03)式中 $\alpha(T)$ 对 $f(x)$ 的关系相同，那么，

$$h(Tx) = \sum A_k \alpha_k(T) f_k(x) . \tag{2.05}$$

这就是说，如果 $h(x)$ 能用群特征标集来展开，则对所有的 T，$h(Tx)$ 都能用这些特征标来展开。

前面已经看到，群特征标的积和反演构成群的另外一些特征标；同样可以看到，常数 1 是群的一个特征标。因此，群特征标对一特征标的乘法构成群特征标自身的一个变换群，我们把它叫做原群的**特征标群**。

如果原群是无限长直线上的平移群，即运算子 T 使 x 变为 $x+T$，则(2.03)式变为

$$f(x+T) = \alpha(T)f(x) , \tag{2.06}$$

这个等式在 $f(x)=e^{i\lambda x}$，$\alpha(T)=e^{i\lambda T}$ 时成立。这时特征标是函数 $e^{i\lambda x}$，特征标群则是 λ 变为 $\lambda+\tau$ 的平移群，就是说它的构造和原群相同[2]。但如果原群是围绕一个圆的转动，就不会有这种情形。这时，运算子 T 使 x 变为一个在 0 到 2π 间的数，这个数与 $x+T$ 相差 2π 的整数倍，如果要使(2.06)式仍然成立，必须附加条件：

$$\alpha(T+2\pi) = \alpha(T) . \tag{2.07}$$

如果仍令 $f(x)=e^{i\lambda x}$，我们就得到

$$e^{i2\pi\lambda} = 1 , \tag{2.08}$$

这就是说，λ 必须是一整数，正的、负的或零。这样，特征标群就相当于整数的平移。反之，如果原群表示整数的平移群，则(2.06)式中的 x 和 T 只限于是整数值，而 $e^{i\lambda x}$ 只包

[1] 以 19 世纪挪威数学家阿贝尔(Abel)命名。——俄译者注

[2] 即特征标群与原群**同构**。——俄译者注

括从 0 到 2π 间的与 λ 相差 2π 整数倍的数。因此，这时的特征标群实际上是绕圆的转动群①。

在任何一个特征标群中，对于一个给定的特征标 f，$\alpha(T)$的数值分布是这样的：对于群中任何的元 S，当所有的 $\alpha(T)$都乘以 $\alpha(S)$时，$\alpha(T)$的数值分布仍然不变。这就是说，如果我们有某个对 $\alpha(T)$的数值取平均的合理基底，由于这个平均值不受群的每个变换乘上群中某一固定变换而构成的群变换所影响，要就 $\alpha(T)$必须恒为 1②；要就这个平均在乘上了一个不等于 1 的数仍保持不变，所以必须是零；两者必居其一。由此我们得到结论：任一特征标与其共轭③（也是一个特征标）的乘积的平均值是 1，而任一特征标与另一特征标的共轭的乘积的平均值是零。换句话说，如果 $h(x)$能表示成(2.04)式，我们就有

$$A_k = \operatorname{average}\left[h(x)\,\overline{f_k(x)}\right]. \tag{2.09}$$

在绕圆的转动群的情形下，根据这个结果我们直接有：若

$$f(x) = \sum a_n e^{inx}, \tag{2.10}$$

即

$$a_n = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x) e^{-inx}\,dx; \tag{2.11}$$

对于沿无限长直线平移的情形，我们的结果需要比较强的条件；若在适当条件下有

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\lambda) e^{i\lambda x}\,d\lambda, \tag{2.12}$$

即在一定条件下有

$$a(\lambda) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\lambda x}\,dx. \tag{2.13}$$

我们这里只是很粗略地叙述了上面这些结果，并没有详细说明它们有效的条件。关于这个理论的详细讨论，读者可参阅下列的参考书④。

除了线性群不变量理论，还有度量群不变量的一般理论。度量群不变量就是勒贝格的测度系统，它在群所变换的各个元与群的运算子交换时不改变。关于这一点，我们应当援引哈尔(Haar)的饶有趣味的群测度理论⑤。在这个理论中，每一个群，它的元对于群的乘法运算是可交换的。因此，这个群应当有一个不变测度。哈尔曾经证明，大多数的群都具有可以用群自身的构造来定义的唯一的不变测度。

变换群的度量不变量理论的最重要应用，就是它能证明相平均和时间平均的可互替

---

① 此处乃指特征标群 $e^{i\lambda x}$ 的群运算子 τ 使 λ 变为一个在 0 到 2π 间的数，这个数与 $\lambda+\tau$ 相差 2π 的整数倍，又因 x 是整数，$e^{i2\pi x}=1$，故特征标群实际上是一个绕圆的转动群。——汉译者注

② 例如当元素的数目为 n 个的有限群的时候，$\alpha(T)$的平均 M 可以用$\frac{1}{n}\sum_T \alpha(T)$得出，但因为 $M=\frac{1}{n}\sum_T \alpha(T)=\frac{1}{n}\sum_T \alpha(ST)=\frac{1}{n}\sum_T \alpha(S)\alpha(T)=\alpha(S)M$，所以总是 $\alpha(S)=1$ 或者 $M=0$，即便不是有限群，如果"在某种合理的根据之下"得到平均，结果相同。——汉译者注

③ 共轭——$\alpha(T)$的共轭 $\bar{\alpha}(T)$是得出 $\alpha(T)$的共轭复数之值的 T 的函数。——汉译者注

④ Wiener, "The Fourier Integral and Certain of Its Applications", Cambridge Univ. Press(1932).

⑤ Haar, H., "Der Massbegriff in der Theorie der Kontinuierlichen Gruppen", Ann. of Math. (2) 34, pp. 147-169(1933).

性，而这一点，如上所述，吉布斯的尝试是失败了的。这种可互替性借以建立的基础，就是各态历经理论。

各态历经定理通常从一个具有下述性质的系综 E 出发：它的测度可定为 1，并且可以通过一个保测变换 T①或通过保测变换群 T^λ 变换为自身，这里 $-\infty<\lambda<\infty$，且

$$T^\lambda \cdot T^\mu = T^{\lambda+\mu}. \tag{2.14}$$

各态历经理论涉及在 E 的各个元 x 上定义的复值函数 $f(x)$。在所有的场合，我们都认为 $f(x)$ 对 x 是可测的；如果考虑连续变换群 (T^λ)，我们就认为 $f(T^\lambda x)$ 同时对 x 和 λ 是可测的。

在柯普曼和冯·诺伊曼的平均各态历经定理中，$f(x)$ 是 L^2 类的函数，即

$$\int_E |f(x)|^2 \mathrm{d}x < \infty. \tag{2.15}$$

这时，这个定理说：对 T 或 T^λ，我们应有

$$f_N(x) = \frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} f(T^n x) \tag{2.16}$$

或

$$f_A(x) = \frac{1}{A}\int_0^A f(T^\lambda x)\mathrm{d}\lambda. \tag{2.17}$$

在此情形下，当 $N\to\infty$ 或 $A\to\infty$ 时，它们各自平均收敛到极限函数 $f^*(x)$，即

$$\lim_{N\to\infty}\int_E |f^*(x) - f_N(x)|^2 \mathrm{d}x = 0, \tag{2.18}$$

$$\lim_{A\to\infty}\int_E |f^*(x) - f_A(x)|^2 \mathrm{d}x = 0. \tag{2.19}$$

在贝克荷夫的"几乎处处"收敛的各态历经定理中，$f(x)$ 是 L 类的函数，即

$$\int_E |f(x)| \mathrm{d}x < \infty. \tag{2.20}$$

函数 $f_N(x)$ 和 $f_A(x)$ 的定义和(2.16)式及(2.17)式中的一样。这时，这个定理说，除了对测度为 0 的 x 的数值集，极限函数

$$f^*(x) = \lim_{N\to\infty} f_N(x) \tag{2.21}$$

和

$$f^*(x) = \lim_{A\to\infty} f_A(x) \tag{2.22}$$

是存在的。

所谓各态历经变换或度量可迁变换的情形是很有趣的。这时，变换 T 或变换集 T^λ 仅仅对测度为 1 或为 0 的 x 点集才保持不变。在这情形下，使 $f^*(x)$ 能有一定范围数值的一组值几乎恒为 1 或恒为 0(无论对那一个各态历经定理来说)。这种情形只有在 $f^*(x)$ 几乎恒为常数时才可能发生。于是，我们可以假定的值几乎恒为

$$\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x. \tag{2.23}$$

---

① 保测变换(measure preserving transformation) 由系综 E 向其本身的变换 T 便是"保测变换"。其所指的是：在 E 里有测度 m 的定义。就是说，有 E 的某部分系统的族 Ω，对于 $\Omega \ni A$，其测度 $m(A)\geqslant 0$ 是一定的，$m(A)$ 便是具有与面积等同样性质的东西。E 的变换 T 将 E 的部分系综 A 移到 E 的部分系综 $T(A)$，但如果是"$\Omega \ni A$，那么成为 $T(A)\in\Omega$，而且 $m(A)=m(T(A))$"的时候，T 就叫做保测变换(保存测度 M 的变换)。——日译者注

这就是说，在柯普曼的定理中，我们有

$$\underset{N\to\infty}{\mathrm{l.i.m.}}{}^{①}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}f(T^{n}x)=\int_{0}^{1}f(x)\mathrm{d}x\ ; \tag{2.24}$$

而在贝克荷夫的定理中，除了对测度为 0 或概率为 0 的 x 以外，我们有

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}f(T^{n}x)=\int_{0}^{1}f(x)\mathrm{d}x\ . \tag{2.25}$$

对于连续群(T^{λ})的情形，也有类似的结果，以上就是吉布斯相平均和时间平均的可互替性的充分证明。

对于变换 T 或变换群 T^{λ} 非各态历经的情形，冯·诺伊曼在很普遍的条件下指出，它们可以分解为各个各态历经的成分。就是说，除了对测度为 0 的 x 集，我们总能把 E 分离成有限个或可列个集 E_n 和一个集类 $E(y)$ 的连续统，使得对各个 E_n 和 $E(y)$ 都存在一个在 T 或 T^{λ} 作用下保持不变的测度。这样，变换 T 和 T^{λ} 对 E_n 和 $E(y)$ 就是各态历经的了；如果 $S(y)$ 是 S 和 $E(y)$ 的相交部分，S_n 是 S 和 E_n 的相交部分，那么，

$$\underset{E}{\text{测度}}(S)=\int\underset{E(y)}{\text{测度}}[S(y)]\mathrm{d}y+\sum\underset{E_n}{\text{测度}}(S_n) \tag{2.26}$$

换句话说，整个保测变换理论可以归结为各态历经变换的理论。

由以上所述可以看出，全部各态历经理论都可以运用到比那些与直线上平移群同构的变换群还要普遍的变换群上去，特别是，它可以运用到 n 维平移群的情形。三维的情形在物理上是重要的。时间平衡的空间比拟就是空间的均匀性，这个理论像均匀气体、均匀流体或均匀固体的理论一样建立在三维的各态历经理论的应用上。有时，一个三维的非各态历经平移变换群，好像是不同状态混合起来的平移集；它使得在一给定时刻只存在这个状态或那个状态，而不存在两者的混合状态。

统计力学的重要概念之一，同时也能用在古典热力学中的，就是熵的概念。它首先是用来反映相空间中的一种性质，即表示相空间区域的概率测度的对数。例如，假设在一个瓶中有 n 个粒子，这个瓶被分为 A 和 B 两部分；让我们从动力学上来考虑这 n 个粒子系统的情形。如果 m 个粒子在 A 中，$n-m$ 个粒子在 B 中，那么相空间中某个区域就特征化了：它具有一定的概率测度。这概率测度的对数就是 m 个粒子在 A 中，$n-m$ 个粒子在 B 中这种分布的熵。这个力学系统大部分时间所处的状态将接近最大熵的状态，也就是说，在大部分时间内，约为 m_1 个粒子将在 A 中，$n-m_1$ 个粒子将在 B 中，而 m_1 个在 A 中 $n-m_1$ 个在 B 中的组合概率最大。这意味着，对于由大量粒子构成的系统和实际上可能识别的状态说，如果系统中粒子状态的分布使系统的熵不为最大，那么我们就观察到系统以后的变化几乎总是使得熵增加。

在关于热机这种普通的热力学问题中，我们处理问题的条件是：在气缸这样大的区域内大致达到了热平衡。我们要研究的是熵的那些状态，它们是在给定温度和体积下熵

---

① $\underset{N\to\infty}{\mathrm{l.i.m.}}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}f(T^{n}x)=\int_{0}^{1}f(x)\mathrm{d}x$ 表示

$\lim_{N\to\infty}\int_{0}^{1}\left|\frac{1}{N-1}\sum_{N=0}^{N}f(T^{n}x)-\int_{0}^{1}f(x)\mathrm{d}x\right|^{2}\mathrm{d}x=0$。[l.i.m. 是平均值的极限(limir in the mean)的意见]——日译者注

为最大，或者是那些在我们所采用的某个温度下，对全部体积中的少数区域熵为最大的那些状态。即使我们去更详细地讨论热机，甚至讨论像涡轮机这种气体膨胀方式比气缸中的更为复杂的热机，上述条件也没有什么根本的改变。我们这时仍然可以谈到局部的温度，而且近似程度非常的好，虽然只有在平衡状态并用只对平衡状态有意义的方法才能精确地决定温度。但是，在生命物质中，甚至这种大致的均匀性也很难找到。我们用电子显微镜可以看到蛋白质具有非常确定和精细的结构。它的生理现象肯定是同样精细的。这种精细的程度远远超过通常温度计的"时-空"标度精细程度，因此，用普通温度计读出的有生命组织的温度，只是粗略的平均值，不是真正的热力学温度。吉布斯的统计力学可以作为躯体内部变化情形的非常合适的模型；但普通热机提供的图景就完全不对头。肌肉动作的热效率几乎没有什么意义，它肯定不是意味它表面上所显示的那种意义。

统计力学中有个很重要的观念，这就是麦克斯韦妖(Maxwell demon)的观念。假设有一气体，其中的粒子按照给定温度下统计平衡的速度分布而运动。对于理想气体，这个分布是麦克斯韦分布。假定现在将这气体装在一个坚固的容器中，器内有一壁隔在中间，壁上有一可以打开的小门，由一守门者来管理；这守门者可以是个类人妖，也可以是个小的机械装置。当大于平均速度的粒子从室 A 趋近门或小于平均速度的粒子从室 B 趋近门时，守门者就打开门，粒子通过它；但当小于平均速度的粒子从室 A 趋近门或大于平均速度的粒子从室 B 趋近门时，门就被关上。这样，室 B 中集中的高速度粒子在不断增加，而室 A 的则不断减少。这显然使熵不断减少；因此，如果这时用一个热机把这两个室连接起来，我们似乎就得到第二类永动机。

拒绝由麦克斯韦妖产生的问题要比解答这个问题简单。否认这种东西或这种结构存在的可能性是最容易不过的事了。实际上我们下面将看到，对一个处在平衡状态系统，严格意义上的麦克斯韦妖不可能存在；可是如果我们一开始就接收这一点而不加以论证，那我们就要失去一个难得的机会来学习关于熵和关于在物理学上、化学上、生物学上为可能的系统的知识。

麦克斯韦妖在动作以前，必须收到有关前来的粒子的速度和它们碰到壁上的位置的信息。因此，无论在这些碰撞中是否发生能量的传递，麦克斯韦妖和气体之间必然要有相互联系。我们知道，熵增加定律只能适用于完全孤立的系统，并不适用于系统的非孤立部分。因此，我们要关心的仅仅是气体-妖这个系统的熵，不是气体的熵。气体的熵仅仅是这个大系统的总熵的一部分。问题是，我们能不能同时求出麦克斯韦妖对总熵贡献的那一部分熵呢？

完全可以肯定，我们能。麦克斯韦妖只有根据收到的信息才能动作，而这些信息，如我们在下一章看到的，表示一负熵。信息必须通过某种物理过程来传递，譬如说通过某种形式的辐射来传递。这些信息当然完全可以在很低的能量下传递，而且粒子与麦克斯韦妖之间能量传递的意义一般比信息传递的意义小得多。但是，根据量子力学，如果我们不积极去影响试验粒子的能量，使得它超过某一极小值(由试验所用光的频率决定)，我们要得到有关粒子位置和动量的任何信息都是不可能的，要同时得到位置和动量的任何信息就更不可能了。因此，所有各种联系严格说来都是能量的耦合；一个处在统计平

衡状态的系统，就是对熵和对能量这两者都达到平衡的系统。麦克斯韦妖早晚总要陷于和它周围温度相应的无规运动，正像莱布尼兹所说的某些单子(monads)一样，它收到大量的微小印象，以致陷于"晕头转向"而没有清楚的知觉。事实上，这时麦克斯韦妖已不再作为麦克斯韦妖而动作了。

虽然如此，在麦克斯韦妖失去调制力以前还是有一段相当显著的时间，我们可以认为它在这段时间中的动作状态是亚稳的。我们没有理由认为亚稳的麦克斯韦妖事实上不存在；其实，我们完全可以认为酶就是亚稳的麦克斯韦妖，不过它的熵减少也许不是由于快粒子和慢粒子的分离，而是由于其他某种相当的过程。我们可以用这个见解来看待生命机体，例如人本身。酶和生命机体肯定都是亚稳的：酶的稳定状态就是失去调制力，生命机体的稳定状态就是死亡。所有的催化剂最终都要中毒：它们能够改变反应速度，但不能改变真正的平衡状态。然而，催化剂和人都具有充分确定的亚稳状态，而且应当认为这些状态具有相对持久性。

在结束本章时，我想指出，各态历经理论是一个比以上讨论的更广泛得多的论题。目前它又获得了某些发展，有人已经证明了，对变换集保持不变的测度可以直接通过这个变换集自身来定义，不需预先假定它存在。这里，我特别要提到克雷洛夫(Крылов)和波哥留波夫(Боголюбов)的工作，还有赫里维奇和日本学派的一些工作。

下一章专门讨论时间序列的统计力学。这是另外一个领域，在这个领域中，我们遇到的条件和热机统计力学中遇到的条件非常不同，因此它很适合用来作为生命机体变化过程的模型。

第三章

时间序列，信息和通信

· III Time Series, Information, and Communication ·



1928年和1929年秋，维纳的长女巴巴拉、次女佩吉接连降生了，维纳像一个笨手笨脚的学生，学着如何照料妻子和孩子。他一会儿要耐心地哄孩子睡觉，一会儿要清洗尿布，然后像挂信号旗似地晾起来，一会又要去厨房烧牛奶，忙得不亦乐乎。这是他第一次体会到一家之主的责任感和自豪感，为家庭和事业继续努力，他信心十足。毫无疑问，美满的婚姻与和睦的家庭是维纳走向成功的坚强后盾。



在很大一类现象中，我们所观测的往往是一个分布在各时刻的数量，或一系列数量。连续记录的温度计记录下来的温度，股票交易所每日的股票牌价、气象局逐日公布的全部气象数据，都是连续的或离散的，简单的或多重的时间序列。这些时间序列都是变化比较慢的，很适合用笔算或用计算尺和计算机这类普通的数字计算工具来处理。它们属于普通统计理论研究的范围。

电话线、电视线路或雷达装置部件中迅速变化着的电压序列，在一般现象中是不常见到的；它们同样属于统计学和时间序列理论的研究范围，虽然用来组合和变换这些电压的装置一般必须动作得很快，以便使输出的结果能够和高速变化的输入同步。电话接收器、滤波器、贝尔电话研究所的伏考德（Vocoder）[①]那样的声音自动编码装置、调频网络和它的相应接收器，所有这些本质上都是高速演算的装置，它们抵得上整个统计研究室的全部计算机器、计算表和计算员。如同防空炮火控制系统中的自动测距器和自动瞄准器一样，使用这些装置所必需的机巧是事先就设计在其中了。这样做的原因和防空炮火控制系统的情形一样，都是由于操作过程工作得太快，不容许人去插手。

无论在计算工作室或在电话线路中，时间序列和处理时间序列的装置都要涉及信息的记录、储藏、传递和使用等问题。这里的信息是什么，如何测量它？最简单最基本的信息形式，就是对两个具有相同概率的二中择一的简单事件所作选择的记录，选择时不是这个事件就是那个事件一定要发生。例如，掷硬币时花或字的选择记录就是这种形式的信息。我们把一次这种二中择一的选择叫做一次决断。现在，如果事前已知某个量落在 A 和 B 之间，且以先验的均匀概率落在这个区间中的任何一点，试求对这个量进行完全精确测量后获得的信息量。我们将看到，如果令 $A=0$ 和 $B=1$，并以二进位制的无穷二进位小数 $.a_1a_2a_3\cdots a_n$ 表示这个变量，这里每个 $a_1, a_2, \cdots$ 的数值或为 0 或为 1，则所作选择的次数为无限次，因而所求的信息量为无限大。这里，

$$.a_1a_2a_3\cdots a_n\cdots = \frac{1}{2}a_1 + \frac{1}{2^2}a_2 + \cdots + \frac{1}{2^n}a_n + \cdots, \tag{3.01}$$

但是，任何实际进行的测量都不是完全精确的。如果测量具有一均匀分布的误差，落在 $.b_1b_2\cdots b_n\cdots$ 范围内，这里 b_k 是头一位不等于 0 的数字，则所有从 a_1 到 a_{k-1}（可能还到 a_k）的决断才是有意义的，所有以后的决断都没有意义。这时，需作决断的次数一定接近于

$$-\log_2 .b_1b_2\cdots b_n\cdots, \text{[②]} \tag{3.02}$$

---

① 伏考德——“合成”电话的装置，在这种电话中，简化了的指挥信号代替真正的语言信号在通信线路上传输，这些简化的信号是在输出端经过对语言的分析而产生的。在接收端，经过指挥信号（它决定于音调的高低强弱和节律等）的操纵，原来的语言又被人工地合成出来。——俄译者注

② $-\log_2 .b_1b_2\cdots b_n\cdots = \log_2 \frac{1}{.b_1b_2\cdots b_n\cdots}$。——汉译者注

我们将用这个量作为信息量的精确公式，同时就把它作为信息量的定义。

我们可以如下地来考虑这个定义：事前已知一变数落在 0 到 1 之间，事后得知它落在$(0,1)$中的区间(a,b)上。于是我们从事后知识中得到的信息量为

$$-\log_2 \frac{(a,b)\text{ 的测度}}{(0,1)\text{ 的测度}}. \tag{3.03}$$

然而，让我们现在来考虑另外一种情形：我们事前的知识是已知某个量应落在 x 到 $x+dx$之间的概率为 $f_1(x)dx$，事后的知识是得知这概率为 $f_2(x)dx$。试问，事后的知识给了我们多少新的信息？

这个问题实质上是把曲线 $y=f_1(x)$ 和 $y=f_2(x)$ 下的区域的大小用某种宽度来表示①。应当注意，我们这里要假定变数 x 具有基本均匀分布，就是说，如果用 x^3 或任何 x 的其他函数来代替 x，我们的结果一般不会相同。由于 $f_1(x)$是概率密度，我们有

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)dx = 1, \tag{3.04}$$

因而，$f_1(x)$下区域宽度的平均对数可以看成 $f_1(x)$倒数的对数之高度的某种平均。因此，相应于曲线 $f_1(x)$的信息量的合理测度为②

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)] f_1(x)dx. \tag{3.05}$$

这个我们把它定义为信息量的量，是通常在类似情况下定义为熵的那个量的负数。虽然这定义是个统计学的定义，而且能代替费希尔(R. A. Fisher)统计方法中的定义，但它并不就是费希尔在研究统计问题时所下的那个定义。

特别，当 $f_1(x)$在(a,b)上为常数而在其他各处为 0 时，

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)] f_1(x)dx$$
$$= \frac{b-a}{b-a}\log_2 \frac{1}{b-a}$$
$$= \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.06}$$

将上式所表示的信息与一处在$(0,1)$区间中的点的信息比较，我们就得到差的测度：

$$\log_2 \frac{1}{b-a} - \log_2 1 = \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.07}$$

将变数 x 推广到在二元或多元区域上变动的变数时，上述信息量的定义仍然适用。在二元的场合，函数 $f(x,y)$便得

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy f_1(x,y) = 1; \tag{3.08}$$

而信息量则为

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy f_1(x,y) \log_2 f_1(x,y). \tag{3.081}$$

---

① "用某种宽度来表示"——设 $a<b$，$x=a$ 和 $x=b$ 及 $y=f(x)$，$y=0$ 所包括的部分的面积，便是 $a\leqslant x\leqslant b$ 的概率，信息量应当决定于概率，表示这种信息的曲线，可以将 $y=f(x)$的曲线在各 x 上向 y 方向移动某种程度而得到。这就叫做用某种宽度来表示。——日译者注

② 这里引用了作者与冯·诺伊曼的私人通信内容。

注意,如果 $f_1(x,y)$ 的形式为 $\phi(x)\psi(y)$,而且

$$\int_{-\infty}^{\infty}\phi(x)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{\infty}\psi(y)\mathrm{d}y=1\ , \tag{3.082}$$

则

$$\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}x\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}y\phi(x)\psi(y)=1\ ; \tag{3.083}$$

并有

$$\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}x\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}yf_1(x,y)\log_2 f_1(x,y)\\ =&\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}x\phi(x)\log_2\phi(x)+\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}y\psi(y)\log_2\psi(y)\ ;\end{aligned} \tag{3.084}$$

即来自独立信源的信息量是可加的。

固定问题中一个或多个变数而求由此获得的信息量,是一个有趣的问题。例如,假定变数 u 落在 x 到 $x+\mathrm{d}x$ 之间的概率为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi a}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2a}}\mathrm{d}x$,变数 v 落在同一范围内的概率为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi b}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2b}}\mathrm{d}x$。如果得知 $u+v=w$,我们由此获得多少关于 u 的信息?这里,显然有 $u=w-v$,而 w 的值是固定的。我们假设 u 和 v 的事前分布是彼此独立的。于是,u 的事后分布正比于

$$\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2a}}\mathrm{e}^{-\frac{(w-x)^2}{2b}}=c_1\mathrm{e}^{-(x-c_2)^2\frac{a+b}{2ab}}, \tag{3.09}$$

式中 c_1 和 c_2 都是常数。这两个常数在由于 w 固定而增加的信息量的表示式中都不出现。

当我们得知 w 的值时,关于 u 的信息量的增加由上式可知为

$$\begin{aligned}&\frac{1}{\sqrt{2\pi\frac{ab}{a+b}}}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{e}^{-(x-c_2)^2\frac{a+b}{2ab}}\left[-\frac{1}{2}\log_2 2\pi\frac{ab}{a+b}-(x-c_2)^2\frac{a+b}{2ab}\log_2\mathrm{e}\right]\mathrm{d}x\\ &-\frac{1}{\sqrt{2\pi a}}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2a}}\left[-\frac{1}{2}\log_2 2\pi a-\frac{x^2}{2a}\log_2\mathrm{e}\right]\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\log_2\frac{a+b}{b}\ .\end{aligned} \tag{3.091}$$

注意,(3.091)式的值是正的,且与 w 无关。它是 u 和 v 的均方的和除以 v 的均方的对数的一半。如果 v 只在小范围内变化,则由 $u+v$ 的知识提供我们关于 u 的信息量将很大,当 b 趋于 0 时它为无限大。

我们可以用下面的解释来考虑这个结果。我们把 u 当做消息而 v 当做噪声。于是,在无噪声存在时,由正确消息带来的信息量为无限大。有噪声存在时,信息量则是有限的,随着噪声强度的增加,它非常迅速地趋于 0。

我们说过,信息量是一个可以看做概率的量的对数的负数,它实质上就是负熵。下面我们来证明一件有趣的事:信息量的平均具有熵的各种性质。

令 $\phi(x)$ 和 $\psi(x)$ 是两个概率密度;于是 $\frac{\phi(x)+\psi(x)}{2}$ 也是一概率密度。我们有

$$\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\phi(x)+\psi(x)}{2}\log\frac{\phi(x)+\psi(x)}{2}\mathrm{d}x\\ \leqslant&\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\phi(x)}{2}\log\phi(x)\mathrm{d}x+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\psi(x)}{2}\log\psi(x)\mathrm{d}x\ .\end{aligned} \tag{3.10}$$

这是由下一关系导出的：

$$\frac{a+b}{2}\log\frac{a+b}{2} \leqslant \frac{1}{2}(a\log a + b\log b)\ . \tag{3.11}$$

换句话说，$\phi(x)$和$\psi(x)$下区域的交叠，使得关于$\phi(x)+\psi(x)$的最大信息量减少。另一方面，如果$\phi(x)$是一在(a,b)以外为零的概率密度，则当$\phi(x)$在(a,b)上为$\phi(x)=\frac{1}{b-a}$而在其他各处为零时，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\phi(x)\log\phi(x)\mathrm{d}x \tag{3.12}$$

是极小值。这是由于对数曲线向上凸的缘故。

如我们所应当预期的，信息损失的过程与熵增加过程十分相似。信息损失过程发生在原来是彼此分开的各个概率区域有相互融合的时候。例如，当我们把某个变数的分布用该变数之函数的分布来代替，而这函数对该变数的不同值取相同值时，或者，当我们允许一个多变数函数中的某个变数任意地在其自然变域上变动时，我们就损失信息。对消息作任何操作都不能使平均信息量增加。这里，热力学第二定律对通信工程完全适用。反过来，对一暧昧事件的详细调整，如我们所看到的，一般将使平均信息量增加，而不会损失信息。①

下面的情形是很有趣的。我们有一个变数为$(x_1,\cdots,x_n)$的n元概率分布密度$f(x_1,\cdots,x_n)$，同时还有m个非独立变数$y_1,\cdots,y_m$。当固定这m个变数时，我们由此获得的信息量是多少？首先，假定它们被固定在$y_1^*, y_1^*+\mathrm{d}y_1^*,\cdots,y_m^*,y_m^*+\mathrm{d}y_m^*$之间。让我们取

---

① 设$K(\phi)=\begin{cases}\phi\log\phi, & \phi>0,\\ 0, & \phi=0,\end{cases}$ $b-a>0$，设想未必不相异的n个点$[\phi_i,K(\phi_i)]$ $(i=1,2,\cdots,n)$（但$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\phi_i=\frac{1}{b-a}$）如果在这些点上各个给予质量$\frac{1}{n}$时的质量中心为$C$，则

$$C=\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\phi_i,\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K(\phi_i)\right]=\left[\frac{1}{b-a},\frac{1}{b-a}\sum_{i=1}^{n}\frac{b-a}{n}\cdot K(\phi_i)\right].$$

这个点C属于包含上面n个点的最小的凸集合。因为$\frac{\mathrm{d}^2K(\phi)}{\mathrm{d}\phi^2}=\frac{1}{\phi}>0$，所以$y=K(\phi)$的曲线在下方是凸的。所以重心$C$的纵坐标是在$K(\frac{1}{b-a})$的上面。因此，$\sum_{i=1}^{n}\frac{b-a}{n}K(\phi_i)\geqslant(b-a)K(\frac{1}{b-a})=\log\frac{1}{b-a}$·（＊）在这里能成立等号的，只限于所有$n$个点都与$[\frac{1}{b-a},K(\frac{1}{b-a})]$一致的时候。如果当$n\to\infty$，那么这对于在$a\leqslant x\leqslant b$中以密度$\phi(x)$分布的概率分布$\left[\int_a^b\phi(x)\mathrm{d}x=1\right]$中，使得所得到的信息量$\int_a^b\varphi(x)\log\varphi(x)\mathrm{d}x$为最小的，只限于$\varphi(x)=\frac{1}{b-a}$的时候，而且，这时候的信息量与$\log\frac{1}{b-a}$相对应。

其次是如上面（＊）所证明，如果在$\phi_i(i=1,2,\cdots,n)$之中愈接近于$\frac{1}{b-a}$的值的东西，质量中心的纵坐标便愈小，即信息量$\int_a^b\phi(x)\log\phi(x)\mathrm{d}x$，如果在$\phi(x)$中接近于$\frac{1}{b-a}$的值的东西越多，便愈接近最小值$\log\frac{1}{b-a}$。又上面的$\log\frac{1}{b-a}$，如果$(b-a)$愈大便愈小，即，概率分布的范围$a\leqslant x\leqslant b$越广，那么对于此的信息的最小值$\log\frac{1}{b-a}$便愈小。——日译者注

$x_1, x_2, \cdots, x_{n-m}, y_1, y_2, \cdots, y_m$ 作为新的变数集合。这时，对新的变数集，我们的分布函数在 $y_1^* \leqslant y_1 \leqslant y_1^* + \mathrm{d}y_1^*, \cdots, y_m^* \leqslant y_m \leqslant y_m^* + \mathrm{d}y_m^*$ 决定的区域 R 上将与 $f(x_1, \cdots, x_n)$ 成正比，而在 R 以外为零。因此，由于规定 y 而获得的信息量为

$$\frac{\underbrace{\int \mathrm{d}x_1 \cdots \int}_{R} \mathrm{d}x_n f(x_1, \cdots, x_n) \log_2 f(x_1, \cdots, x_n)}{\underbrace{\int \mathrm{d}x_1 \cdots \int}_{R} \mathrm{d}x_n f(x_1, \cdots, x_n)}$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \cdots, x_n) \log_2 f(x_1, \cdots, x_n)$$

$$= \left\{ \begin{aligned} & \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m} \left| J\begin{pmatrix} y_1^*, \cdots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \cdots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \cdots, x_n) \log_2 f(x_1, \cdots, x_n)}{\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m} \left| J\begin{pmatrix} y_1^*, \cdots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \cdots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \cdots, x_n)} \\ & -\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \cdots, x_n) \log_2 f(x_1, \cdots, x_n) \end{aligned} \right\} \tag{3.13}$$

(3.13)式的推广问题与下一问题有密切关系：在上述场合下，仅仅关于变数 $x_1, \cdots, x_{n-m}$ 的信息是多少？我们知道，这些变数的事前概率密度为

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m+1} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \cdots, x_n) \; ; \tag{3.14}$$

固定 y^* 后，未规格化的概率密度为

$$\sum \left| J\begin{pmatrix} y_1^*, \cdots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \cdots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \cdots, x_n) \; ; \tag{3.141}$$

式中 $\sum$ 表示对相应于给定一组 y^* 的所有 $(x_{n-m+1}, \cdots, x_n)$ 点集求和。在这个基础上，我们很容易就能写下问题的解答，虽然它少许长些。如果把集 $(x_1, \cdots, x_{n-m})$ 当做广义消息，把集 $(x_{n-m+1}, \cdots, x_n)$ 当做广义噪声；把 y^* 当做被干扰后的广义消息，我们看到，我们给出了推广(3.13)问题的解。

这样，我们至少在形式上得到了推广前面提到的消息噪声问题的解。一组观测可以和一组已知其联合分布的消息和噪声具有任意的关系。我们要确定的是这些观察提供我们多少仅仅关于消息的信息。这是通信工程的中心问题。根据这个问题，我们能够评价调幅、调频或调相这类不同的调制方法，以至它们在传递信息方面的效率。这是个技术问题，这里不适宜作详细讨论；但多少还要说一说。首先，我们能证明：根据前面的信息定义，如果天空中杂乱"天电"的功率具有均匀的频率分布，如果消息被限制在一定的频带内，而且在这频带内的输出功率也是一定的，则任何传递信息的方法都没有调幅方法的效率大，虽然其他方法也可以达到同样的效率。但是，对于用耳或任何其他给定的接收器来接收，用调幅方法传递信息不一定是最适当的形式。这里，我们必须建立一个和上述理论极其类似的理论，来考虑耳和其他接收器的特殊性质。一般说，为了有效地使用调幅或任何其他的调制形式，必须辅助使用一个适当的译码装置，以便把收到的信息变换为适合人的接收器或机械接收器接收的形式。同样，原来的消息也必须代码化，以便用最压缩的形式传递出去。这个问题在贝尔电话研究所设计伏考德系统时就已经

解决了，至少部分地解决了，有关的一般理论也已由这个研究所的仙农博士以非常令人满意的形式提出来了①。

测量信息的定义和方法就是如此。下面我们来讨论一种可以使信息具有对时间均匀的形式的方法。我们知道，电话和其他通信工具在实际上大都不依赖于特定的时间原点。诚然，有一种操作似乎与此矛盾，但其实不是这样。这是指调制操作。最简单的调制形式是把消息 $f(t)$ 变换为 $f(t)\sin(at+b)$ 的形式。但是，如果我们把因子 $\sin(at+b)$ 当做插进装置中的额外消息，这种情况就可以归入上述一般理论的范围加以讨论。我们称为载波的这个额外消息，并不使通信系统的单位时间信息输送量有任何增加，它所包含的全部信息在任意短的时间间隔内被传递出去，以后，就不再有什么新的信息了。

因此，一个时间上均匀的消息，或者如统计学家所称的，一个处在统计平衡的时间序列，就是这样的一个时间函数或时间函数集：它是由许多这种函数集构成的系综中的一个元，系综中每个元都有一可定义的概率，而且当时间 t 变为 $t+\tau$ 时，这概率分布不变。就是说，如果 T^{λ} 是使 $f(t)$ 变为 $f(t+\lambda)$ 的运算子，则系综的概率对于 T^{λ} 构成的变换群保持不变。这个群满足性质：

$$T^{\lambda}[T^{\mu}f(t)] = T^{\mu+\lambda}f(t) \quad (-\infty < \lambda < \infty, -\infty < \mu < \infty). \tag{3.15}$$

由此可知，如果 $\Phi[f(t)]$ 是 $f(t)$ 的泛函[即一依赖于 $f(t)$ 在 t 由 $-\infty$ 到 ∞ 中的全部历史的数]，且 $f(t)$ 对整个系综的平均是有限的，我们就可以引用上一章的贝克荷夫各态历经定理而得出结论：除了对概率为零的 $f(t)$ 的数值集以外，$\Phi[f(t)]$ 的时间平均

$$\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_0^A \Phi[f(t+\tau)]d\tau = \lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_{-A}^0 \Phi[f(t+\tau)]d\tau \tag{3.16}$$

是存在的。

此外还有一结果。我们在上一章讲到过另一个由冯·诺伊曼提出的关于各态历经理论的定理，这个定理说，如果一系统在保测变换群(3.15)作用下仍变为自身，则除了对概率为 0 的元以外，系统的任一个元都属于在同一变换群作用下仍变为自身的某一子集(可以是整个系统自身)，这子集具有一定义在自身上的测度，它在上述变换群作用下也保持不变；此外，这子集还有如下的性质：如果它的任一部分具有对上述变换群保持不变的测度，则这测度或者等于整个子集的测度，或者为零②。如果我们不考虑所有不属于这子集③的元，并使用它的适当的测度，我们将发现，时间平均(3.16)几乎在所有情况下都是 $\Phi[f(t)]$ 在整个 $f(t)$ 函数空间上的平均，即所谓相平均。因此，在上述函数 $f(t)$ 的系综的场合，除了对概率为零的情形，我们都能用时间平均代替相平均的方法，根据系综中

---

① 详见 C. E. Shannon, "The mathematical Theory of Communication", Univ, of Illinois Press, 1949——日译者注

② 如果把在这里所讲的事用符号来写便成为下面这样：把 Ω 作为函数的系综(ensemble)的全体，把 N 作为"除外系综"。Ω 中有测度 m 的定义 $m(N)=0$，$\Omega-N$ 分为所谓"各态历经部分"Ω_{λ} 的直和。Ω_{λ} 对于保测变换群不变，而且有不变测度 m_{λ}，如果 Ω_{λ} 的部分系综 M_{λ} 对于 F 不变，则 $m_{\lambda}(M_{\lambda})=m_{\lambda}(\Omega_{\lambda})$ 或者 0。——日译者注

③ 即 $f\notin N$，因之对于某 λ 是 $f\in\Omega_{\lambda}$，作为测度而使用 m_{λ}[m_{λ} 对于 Ω_{λ} 的部分系综以外的 Ω 的任意的部分系综 M，同时都是 $m_{\lambda}(M)=0$]，Ω_{λ} 是各态历经的，所以用 m_{λ} 测量把测度为 0 的 $f\in\Omega_{\lambda}$ 除去，(3.16)便等于 $\int_{\Omega_{\varphi}}[f(t)]m_{\lambda}(df)$。——日译者注

任一时间序列的记录，以求出系综的任一统计参数的平均——实际上我们能同时求出系综的任一可数统计参数集。而且，我们几乎只要知道这些时间序列中的任何一个序列的过去就够了。换句话说，当给定已知属于一统计平衡系综的某一时间序列在现在以前的全部历史时，我们就能以误差概率为零的精度计算出该时间序列所属的统计平衡系综的整个统计参数集。上面表述的理论都是对简单时间序列而言的；但这些理论对于具有几个同时变化的变量而非具有一个变量的多重时间序列同样正确。

我们现在可以用上述理论来讨论有关时间序列的各种问题了。我们只限于考虑如下场合的时间序列：它的全部过去能够用可数个量的集决定。例如，对于范围很广的一类函数 $f(t)(-\infty<t<+\infty)$，当已知一组量

$$a_n = \int_{-\infty}^{\infty} e^{t} t^n f(t)\,dt \qquad (n=0,1,2,\cdots) \tag{3.17}$$

时，f 就完全被决定。令 A 为未来的 t 值的某一函数，即 A 为大于零的 t 值的函数。于是，当函数 f 集[①]在最窄狭可能的意义上被取定时，我们就能根据几乎任意一个时间序列的过去来决定 $(a_0,a_1,\cdots,a_n,A)$ 的同时分布。特别，如果 $a_0,\cdots,a_n$ 全部给定，A 的分布就可以决定。这里，我们要用到尼可杜(Nikodym)关于条件概率的著名定理。由这个定理可知，在很普遍的情况下，这分布当 $n\to\infty$ 时收敛到一极限，而这个极限分布将提供我们关于任一未来量分布的全部知识。同样，如果知道了过去，我们就可以决定任何一组未来量的数值的同时分布，或任何一组决定于过去和未来两方面的量的数值的同时分布。因此，如果我们对任何统计参数或统计参数集的“最优值”都能作出适当的解释——多半是在平均值或中值或众值的意义上，我们就能由这个已知分布把它们计算出来，得到一个就其优良程度而言能够满足我们所要求的预测准则的预测。我们能够用任意的统计估计方法——均方误差或最大误差或平均绝对误差等等，来计算这预测的价值。我们能够计算因固定过去而提供我们的关于任一统计参数或统计参数集的信息量。由关于过去的知识，我们甚至能计算某一瞬间以后全部未来的总信息量。由于我们通常能够由过去推知未来，所以，即使上述的瞬间就是现在，我们关于现在的知识中也会包含无限大的信息量。

另一有趣的情形是多重时间序列的情形，在这种情况下，我们仅仅精确地知道它的若干成分的过去。任何一个不仅仅依赖于这些过去的量的分布，都能用十分类似上述的方法来研究。特别，我们可以推知其他成分的数值或其他一组成分的数值集在过去、现在或未来某一瞬间的分布。滤波器的一般问题就属于这一类问题。假定消息和噪声以一定方式混合为一个被扰乱了的消息，而我们知道这被扰乱消息的过去。我们也知道作为时间序列的这消息和噪声的统计联合分布。现在要求过去、现在或未来某一瞬间的消息分布。就是说，我们要求出一个作用于被扰乱消息的过去的运算子，它能在一定的统计意义上最优地给出真实的消息，我们可以得到一个估计消息的误差程度的统计估计方法。最后，我们可以计算由这消息获得的信息量。

下面一种时间序列系综特别简单而重要。这就是布朗运动的时间序列系综。布朗

---

① 意思是在上面所说的时间平均＝相平均能使用的那种统计的平衡的系综中选取出来的 f。——日译者注

运动是气体中粒子受到其他作热运动的粒子的无规则碰撞而产生的一种运动。这方面的理论是由爱因斯坦、斯莫路绰斯基、皮林和作者①等许多学者发展起来的。在布朗运动的场合，除非我们采取的时间间隔非常小，使得粒子之间的个别碰撞都能一一分辨出来，否则粒子的运动将呈现一种奇妙的不可微性。在给定时间内，粒子在任一给定方向上位移的平方平均和时间长度成正比，而且在相继各时间间隔内的运动彼此完全不相关。这和物理观测的结果非常符合。如果我们把布朗运动的标度规格化为时间标度，而且只考虑运动的坐标 x 上的分量，并假设 $x(t)$ 在 $t=0$ 时等于 0，则当 $0\leqslant t_1\leqslant t_2\leqslant\cdots\leqslant t_n$ 时，粒子在时间 t_1 落在 x_1 到 $x_1+\mathrm{d}x_1$ 之间，……，在时间 t_n 落到 x_n 到 $x_n+\mathrm{d}x_n$ 之间的概率为

$$\frac{\exp\left(-\frac{x_1^2}{2t_1}-\frac{(x_2-x_1)^2}{2(t_2-t_1)}-\cdots-\frac{(x_n-x_{n-1})^2}{2(t_n-t_{n-1})}\right)}{\sqrt{[(2\pi)^n t_1(t_2-t_1)\cdots(t_n-t_{n-1})]}}\mathrm{d}x_1\cdots\mathrm{d}x_n. \tag{3.18}$$

在与此对应的有确定值的这个概率系统的基础上，我们能够用一个介于 0 到 1 之间的参数 α 来表示各种可能的布朗运动路径的集合，每一路径表示为一函数 $x(t,\alpha)$，这里，x 由时间 t 和分布参数 α 决定（任一路径含于某一集 S 的概率等于 S 中相应路径的 α 值的集合的测度）。这样一来，几乎所有的路径都是连续的，但是不可微的。

决定 $x(t_1,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha)$ 对 α 的平均，是一个很有趣的问题。在 $0\leqslant t_1\leqslant\cdots\leqslant t_n$ 的假定下，这个平均是

$$\begin{aligned}&\int_0^1\mathrm{d}\alpha x(t_1,\alpha)x(t_2,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha)\\&=(2\pi)^{-\frac{n}{2}}[t_1(t_2-t_1)\cdots(t_n-t_{n-1})]^{\frac{1}{2}}\times\\&\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}\xi_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}\xi_n\xi_1\xi_2\cdots\xi_n\exp\left[-\frac{\xi_1^2}{2t_1}-\frac{(\xi_2-\xi_1)^2}{2(t_2-t_1)}-\right.\\&\left.\cdots-\frac{(\xi_n-\xi_{n-1})^2}{2(t_n-t_{n-1})}\right].\end{aligned}\tag{3.19}$$

令

$$\xi_1\cdots\xi_n=\sum A_k\xi_1^{\lambda_{k,1}}(\xi_2-\xi_1)^{\lambda_{k,2}}\cdots(\xi_n-\xi_{n-1})^{\lambda_{k,n}},\tag{3.20}$$

式中 $\lambda_{k,1}+\lambda_{k,2}+\cdots+\lambda_{k,n}=n$. (3.19)式的值将变为

$$\begin{aligned}&\sum A_k(2\pi)^{-\frac{n}{2}}[t_1^{\lambda_{k,1}}(t_2-t_1)^{\lambda_{k,2}}\cdots(t_n-t_{n-1})^{\lambda_{k,n}}]^{\frac{1}{2}}\times\\&\prod_j\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}\xi\,\xi^{\lambda_{k,j}}\mathrm{e}^{-\frac{\xi^2}{2(t_j-t_{j-1})}}\\&=\sum A_k\prod_j\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\xi^{\lambda_{k,j}}\mathrm{e}^{-\frac{\xi^2}{2}}\mathrm{d}\xi(t_j-t_{j-1})^{\frac{1}{2}}\\&=\begin{cases}0,\text{若任一 }\lambda_{k,j}\text{ 为奇数；}\\\sum\limits_k A_k\prod\limits_j(\lambda_{k,j}-1)(\lambda_{k,j}-3)\cdots5\cdot3\cdot(t_j-t_{j-1})^{-\frac{1}{2}},\end{cases}\end{aligned}\tag{3.21}$$

若每一 $\lambda_{k,j}$ 者为偶数，

$=\sum\limits_k A_k\prod\limits_j$（把 $\lambda_{k,j}$ 个项划分成对的方法的数目）$\times(t_j-t_{j-1})^{\frac{1}{2}}=\sum\limits_k A_k$（把 n 个项按如下方式

① Paley, R. E. A. C. 和 Wiener, N., "Fourier Transforms in the Complex Domain". Colloquium Publications, Vol. 19, American Math. Soc., New York, 1934, Chapter 10.

划分成对的方法的数目：使 $n=\sum\lambda_{k,j}$，并把它分成 $\lambda_{k,j}$ 个项的组的时候，被划分好的任何一对的双方都属于同一个组）$\times(t_j-t_{j-1})^{\frac{n}{2}}$，

$=\sum_j A_j \sum \prod \int_0^1 \mathrm{d}\alpha[x(t_k,\alpha)-x(t_{k-1},\alpha)]\times[x(t_q,\alpha)-x(t_{q-1},\alpha)]$，①，式中第一个 $\sum$ 是对 j 求和；第二个 $\sum$ 是对所有把 n 项分成相应个数目为 $\lambda_{k,1},\cdots,\lambda_{k,n}$ 的块后再分成一对对的方法求和；$\prod$ 是对如下的 k 和 q 的数值对取积：其中从 t_k 及 t_q 选出的 $\lambda_{k,1}$ 元素是 t_1，$\lambda_{k,2}$ 是 t_2，以下类推。由此直接得出如下结果：

$$
\begin{aligned}
&\int_0^1 \mathrm{d}\alpha x(t_1,\alpha)x(t_2,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha) \\
&= \sum \prod \int_0^1 \mathrm{d}\alpha x(t_j,\alpha)x(t_k,\alpha) . \qquad (3.22)
\end{aligned}
$$

式中 $\sum$ 是对所有把 $t_1,\cdots,t_n$ 划分为不同对的划分方法求和，$\prod$ 是对每一种划分中所有的对取积。换句话说，当我们知道一对一对 $x(t_j,\alpha)$ 的乘积的平均时，我们就知道 $x(t,\alpha)$ 的所有多项式的平均，因而也就知道它们的整个统计分布。

以上我们考虑的是 t 为正的布朗运动 $x(t,\alpha)$。如果令

$$
\begin{aligned}
\xi(t,\alpha,\beta) &= x(t,\alpha) \quad (t\geqslant 0); \\
\xi(t,\alpha,\beta) &= x(-t,\beta) \quad (t<0),
\end{aligned} \qquad (3.23)
$$

式中 α 和 β 彼此独立地均匀分布在(0,1)，我们就得到 t 跑过整个实数轴的 $\xi(t,\alpha,\beta)$ 的分布。有一种大家都知道的数学方法，能把一个正方形映象到一线段上，使得面积变为长度。为此我们只需将正方形内各点的坐标写为十进位制形式：

$$\alpha = 0.\alpha_1\alpha_2\cdots\alpha_n\cdots;\ \beta = 0.\beta_1\beta_2\cdots\beta_n\cdots; \qquad (3.24)$$

并令

$$\gamma = 0.\alpha_1\beta_1\alpha_2\beta_2\cdots\alpha_n\beta_n\cdots;$$

这样我们就得到上述性质的映象：线段上的点和正方形中的点几乎是一一对应的。利用这种变换，我们定义

$$\xi(t,\gamma) = \xi(t,\alpha,\beta) . \qquad (3.25)$$

现在我们要来定义

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t)\mathrm{d}\xi(t,\gamma) . \qquad (3.26)$$

显然，我们应当把它定义为斯蒂尔脱耶斯积分②；但 ξ 是 t 的非常不规则函数，因此直接作这样的定义是不可能的事。然而，如果当 $t\to\pm\infty$ 时 K 足够快地趋于零，而且是足够光滑的函数，我们就有理由考虑其部分积分

---

① $\int_0^1 \mathrm{d}\alpha[x(t_k,\alpha)-x(t_{k-1},\alpha)][x(t_q,\alpha)-x(t_{q-1},\alpha)]=\int_0^1 \mathrm{d}\alpha\cdot x(t_k-t_{k-1},\alpha)x(t_q-t_{q-1},\alpha)$，这个式子在 $k\neq q$ 的时候等于0[对于相异的区间 (t_{k-1},t_k) 和 (t_{q-1},t_q) 来说，$x(t_k-t_{k-1},\alpha)$ 和 $x(t_q-t_{q-1},\alpha)$ 是独立的，因为各个的平均值都是0]，如果 $k=q$，则上式

$=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\xi^2\frac{1}{\sqrt{t_k-t_{k-1}}}\exp\left(-\frac{\xi^2}{2(t_k-t_{k-1})}\right)\mathrm{d}\xi=(t_k-t_{k-1})$。——译者注

② Stieltjes, T. J. Annales de la Fac. des Sc. de Toulouse, 1894, p. 165; Lebesgue, H., Leçons sur l' Intégration, Gauthier-Villars et Cie, Paris, 1928.

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma) = -\int_{-\infty}^{\infty} K'(t)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}t\,. \tag{3.27}$$

在这些条件下，我们形式上有

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 \mathrm{d}\gamma\int_{-\infty}^{\infty} K_1(t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty} K_2(t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\\
&=\int_0^1 \mathrm{d}\gamma\int_{-\infty}^{\infty} K'_1(t)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}t\int_{-\infty}^{\infty} K'_2(t)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}t\\
&=\int_{-\infty}^{\infty} K'_1(s)\,\mathrm{d}s\int_{-\infty}^{\infty} K'_2(t)\,\mathrm{d}t\int_0^1 \xi(s,\gamma)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}\gamma\,.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

如果 s 和 t 的符号相反，则

$$\int_0^1 \xi(s,\gamma)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}\gamma = 0\ ; \tag{3.29}$$

但如果符号相同，且 $|s|<|t|$，则

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 \xi(s,\gamma)\xi(t,\gamma)\,\mathrm{d}\gamma = \int_0^1 x(|s|,\alpha)x(|t|,\alpha)\,\mathrm{d}\alpha\\
&=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{|s|(|t|-|s|)}}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}u\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}v\,uv\\
&\qquad\times\exp\left[-\frac{u^2}{2|s|}-\frac{(v-u)^2}{2(|t|-|s|)}\right]\\
&=\frac{1}{\sqrt{2\pi|s|}}\int_{-\infty}^{\infty} u^2\exp\left(-\frac{u^2}{2|s|}\right)\mathrm{d}u\\
&=|s|\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} u^2\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)\mathrm{d}u = |s|\,.
\end{aligned} \tag{3.30}$$

因此，

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 \mathrm{d}\gamma\int_{-\infty}^{\infty} K_1(t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty} K_2(t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\\
&=-\int_0^{\infty} K'_1(s)\,\mathrm{d}s\int_0^s tK'_2(t)\,\mathrm{d}t-\int_0^{\infty} K'_2(s)\,\mathrm{d}s\int_0^s tK'_1(t)\,\mathrm{d}t\\
&\qquad+\int_{-\infty}^0 K'_1(s)\,\mathrm{d}s\int_s^0 tK'_2(t)\,\mathrm{d}t+\int_{-\infty}^0 K'_2(s)\,\mathrm{d}s\int_s^0 tK'_1(t)\,\mathrm{d}t\\
&=-\int_0^{\infty} K'_1(s)\,\mathrm{d}s\left[sK_2(s)-\int_0^s K_2(t)\,\mathrm{d}t\right]\\
&\qquad-\int_0^{\infty} K'_2(s)\,\mathrm{d}s\left[sK_1(s)-\int_0^s K_1(t)\,\mathrm{d}t\right]\\
&\qquad+\int_{-\infty}^0 K'_1(s)\,\mathrm{d}s\left[-sK_2(s)-\int_s^0 K_2(t)\,\mathrm{d}t\right]\\
&\qquad+\int_{-\infty}^0 K'_2(s)\,\mathrm{d}s\left[-sK_1(s)-\int_s^0 K_1(t)\,\mathrm{d}t\right]\\
&=-\int_{-\infty}^{\infty} s\,\mathrm{d}[K_1(s)K_2(s)] = \int_{-\infty}^{\infty} K_1(s)K_2(s)\,\mathrm{d}s\,.
\end{aligned} \tag{3.31}$$

特别，

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 \mathrm{d}\gamma\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau_1)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau_2)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\\
&\qquad=\int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau_2-\tau_1)\,\mathrm{d}s\,.
\end{aligned} \tag{3.32}$$

而且，

$$\int_0^1 d\gamma \prod_{k=1}^{n} \int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau_k)d\xi(t,\gamma)$$

$$= \sum \prod \int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau_j-\tau_k)ds \text{。} \tag{3.33}$$

式中$\sum$是对把$\tau_1,\cdots,\tau_n$划分成对的所有划分方法求和，$\prod$是对每种划分中的各对取积。

表示式

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)d\xi(\tau,\gamma) = f(t,\gamma) \tag{3.34}$$

是一个依赖于分布参数γ的变数t的十分重要的时间序列系综。以上的证明可总结如下：$f(t,\gamma)$分布的所有统计参数都依赖于函数

$$\Phi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau)ds$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} K(s-t)K(s-t+\tau)ds \text{。} \tag{3.35}$$

这个函数就是统计学家称为的自相关函数。因此，$f(t,\gamma)$分布的统计和$f(t+t_1,\gamma)$分布的统计相同；事实上，我们可以证明，如果

$$f(t+t_1,\gamma) = f(t,\Gamma) \text{，} \tag{3.36}$$

则从γ到Γ的变换是保测变换。换句话说，时间序列$f(t,\gamma)$处在统计平均。

而且，如果我们考虑平均

$$\overline{\left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)d\xi(t,\gamma)\right]^m\left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)d\xi(t,\gamma)\right]^n} \text{，} \tag{3.37}$$

它正好包括

$$\int_0^1 d\gamma\left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)d\xi(t,\gamma)\right]^m \int_0^1 d\gamma\left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)d\xi(t,\gamma)\right]^n \tag{3.38}$$

中的项以及

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(\sigma-\tau)K(\tau)d\tau \tag{3.39}$$

的自乘作为因子的有限个项；如果(3.39)在$\sigma\to\infty$时趋于0，则(3.38)将是(3.37)的极限。换句话说，当$\sigma\to\infty$时$f(t,\gamma)$分布和$f(t+\sigma,\gamma)$分布是趋近不相关的。用更普遍的但完全类似的方法，我们能证明，$f(t_1,\gamma),\cdots,f(t_n,\gamma)$和$f(\sigma-s_1,\gamma),\cdots,f(\sigma-s_m,\gamma)$的同时分布当$\sigma\to\infty$时趋于第一组和第二组分布的联合分布。换句话说，任一依赖于t的函数$f(t,\gamma)$的整个数值分布的有界可测泛函或有界可测量[可以把它写成$F\{f(t,\gamma)\}$的形式]，都一定具有下列性质：

$$\lim_{\sigma\to\infty}\int_0^1 \mathcal{F}[f(t,\gamma)]\mathcal{F}[f(t+\sigma,\gamma)]d\gamma = \left[\int_0^1 \mathcal{F}[f(t,\gamma)]d\gamma\right]^2 \text{。} \tag{3.40}$$

如果$\mathcal{F}[f(t,\gamma)]$对t的平移不变，而且它只取0或1的值，则我们有

$$\int_0^1 \mathcal{F}[f(t,\gamma)]d\gamma = \int_0^1 \{\mathcal{F}[f(t,\gamma)]d\gamma\}^2 \text{，} \tag{3.41}$$

因而$f(t,\gamma)$到$f(t+\sigma,\gamma)$的变换群是度量可迁群。由此可知，如果$\mathcal{F}[f(t,\gamma)]$是f的任一作为t的函数的可积泛函，则根据各态历经定理，除了对测度为0的γ集以外，对其他所有的γ值，我们有

$$\int_0^1 \mathscr{F}[f(t,\gamma)]d\gamma$$
$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \mathscr{F}[f(t,\gamma)]dt$$
$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T}^0 \mathscr{F}[f(t,\gamma)]dt \tag{3.42}$$

这就是说，我们几乎完全能根据时间序列系综中某一个例样的过去历史，读取这时间序列的任一统计参数，甚至读取任一统计参数的可列集，实际上，对于这时间序列，当我们知道

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T}^0 f(t,\gamma)f(t-\tau,\gamma)dt \tag{3.43}$$

时，我们就知道几乎每一场合的 $\Phi(t)$，因而就有了关于这时间序列的完备的统计知识。

有一些由这种时间序列决定的量具有十分有趣的性质。特别，我们求

$$\exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t)d\xi(t,\gamma)\right] \tag{3.44}$$

的平均值是很有趣的。形式上，这个平均值可以写成

$$\int_0^1 d\gamma\sum_{n=0}^{\infty}\frac{i^n}{n!}\left[\int_{-\infty}^{\infty}K(t)d\xi(t,\gamma)\right]^n$$
$$= \sum_m \frac{(-1)^m}{(2m)!}\left\{\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right\}^m(2m-1)(2m-3)\cdots5\cdot3\cdot1$$
$$= \sum_m^{\infty}\frac{(-1)^m}{2^m m!}\left\{\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right\}^m$$
$$= \exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right\}. \tag{3.45}$$

用简单的布朗运动序列来建立一个尽可能一般的时间序列，也是一个很有趣的尝试的问题。傅里叶展开的例子提示我们，在作这个尝试时，像(3.44)那样的展开式是一个适合这目的的很方便的组成要素。现在让我们来研究下列特殊形式的时间序列：

$$\int_a^b d\lambda\exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau,\lambda)d\xi(\tau,\gamma)\right]. \tag{3.46}$$

假定我们已知(3.46)式和其中的 $\xi(\tau,\gamma)$，则如(3.45)的情形一样，如果 $t_1>t_2$，我们有

$$\int_0^1 d\gamma\exp\{is[\xi(t_1,\gamma)-\xi(t_2,\gamma)]\}$$
$$\times\int_a^b d\lambda\exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau,\lambda)d\xi(t,\gamma)\right]=$$
$$\int_a^b d\lambda\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2dt-\frac{s^2}{2}(t_2-t_1)-s\int_{t_2}^{t_1}K(t,\lambda)dt\right\}. \tag{3.47}$$

以 $e^{\frac{s^2(t_2-t_1)}{2}}$ 乘以上式两端，并令 $s(t_2-t_1)=i\sigma$，然后使 $t_2=t_1$，则得

$$\int_a^b d\lambda\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2dt-i\sigma K(t_1,\lambda)\right\}. \tag{3.48}$$

我们以 $K(t_1,\lambda)$ 作为一新的独立变数 μ，并解出 λ，得

$$\lambda = Q(t_1,\mu). \tag{3.49}$$

于是(3.48)变为

$$\int_{K(t_1,a)}^{K(t_1,b)} e^{i\omega\mu}\,\mathrm{d}\mu \frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial\mu} \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\{K[t+\tau,Q(t_1,\mu)]\}^2\mathrm{d}t\right). \tag{3.50}$$

运用傅里叶变换,我们由上式能将

$$\frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial\mu}\exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\{K[t+\tau,Q(t_1,\mu)]\}^2\mathrm{d}t\right) \tag{3.51}$$

表示为 μ 的函数,当 μ 是在 $K(t_1,a)$ 和 $K(t_1,b)$ 之间变动时.如果把这个函数对 μ 积分,则得

$$\int_a^{\lambda}\mathrm{d}\lambda\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2\mathrm{d}t\right\}. \tag{3.52}$$

它是 $K(t_1,\lambda)$ 和 t_1 的函数。这就是说,存在一已知函数 $F(u,v)$,使得

$$\int_a^{\lambda}\mathrm{d}\lambda\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2\mathrm{d}t\right\}=F[K(t_1,\lambda),t_1]. \tag{3.53}$$

由于上式左端与 t_1 无关,我们可以把它写作 $G(\lambda)$,而得到

$$F[K(t_1,\lambda),t_1]=G(\lambda). \tag{3.54}$$

式中 F 是一已知函数,我们可以解出它的第一个变数,而得到

$$K(t_1,\lambda)=H[G(\lambda),t_1], \tag{3.55}$$

式中 $H(u,v)$ 也是一已知函数。于是我们有

$$G(\lambda)=\int_a^{\lambda}\mathrm{d}\lambda\exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\{H[G(\lambda),t+\tau]\}^2\mathrm{d}t\right). \tag{3.56}$$

因此,函数

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[H(u,t)]^2\mathrm{d}t\right\}=R(u) \tag{3.57}$$

是一已知函数,而且

$$\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}\lambda}=R(G), \tag{3.58}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}G}{R(G)}=\mathrm{d}\lambda, \tag{3.59}$$

或

$$\lambda=\int\frac{\mathrm{d}G}{R(G)}+\text{常数}=S(G)+\text{常数}. \tag{3.60}$$

这个常数由下式定出:

$$G(a)=0 \tag{3.61}$$

或

$$a=S(0)+\text{常数} \tag{3.62}$$

不难看出,如果 a 是有限的,它取任何值都可以,因为在任一 λ 的数值上加上一个常数时以上的计算不受影响。因此,我们可以令(3.62)中的常数为0。这样,λ 作为 G 的函数就被决定,因而 G 作为 λ 的函数也被决定。于是,由(3.55)我们就能决定 $K(t,\lambda)$。为了决定(3.46)式,我们只需要知道 b。但是比较以下两式就能定出 b:

$$\int_a^{b}\mathrm{d}\lambda\exp\left\{-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t,\lambda)]^2\mathrm{d}t\right\} \tag{3.63}$$

和

$$\int_0^1 d\gamma \int_a^b d\lambda \exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t,\lambda)d\xi(t,\gamma)\right]. \tag{3.64}$$

因此，在一定条件下（这些条件需要严格地加以陈述），如果一时间序列可写成(3.46)的形式，同时又知道 $\xi(t,\gamma)$，则除了 a、λ 和 b 附加的未定常数以外，(3.46)中的函数 $K(t,\lambda)$ 和数 a 及 b 都能决定。即使当 $b=+\infty$ 时，我们也不会有什么困难。当然，不难把上述讨论推广到 $a=-\infty$ 的情形。虽然目前还需要研究其反函数不是单值的那些函数的问题，以及其相应展开能否有效的普遍条件；但我们至少在解决把很大一类时期序列简化为典型形式的问题上向前跨进了一步，而这一点，如本章前面所大略提到的，对于预测理论和信息测量理论具有头等重要的意义。

在上述研究时间序列理论的途径上，我们还应当取消一个明显的限制。这个限制就是：我们必须已知 $\xi(t,\gamma)$，[而且所考虑的时间序列必须能展成(3.46)]的形式。这个问题就是：在什么条件下，我们才能把一个已知其统计参数的时间序列表成一个布朗运动的时间序列，或者，至少把它表成这种或那种意义上的布朗运动时间序列的极限？我们将限于考虑具有度量可迁性质的时间序列，甚至具有更强的性质的时间序列：如果我们取出相距很远的，有固定长度的各时间段，在各时间段中的时间序列的任何泛函的分布彼此是近于无关的，就像各时间段彼此无关那样。① 应当在这方面发展的理论已经大体上由作者完成了。

如果 $K(t)$ 是一充分连续的函数，则由卡斯(Kac)定理，我们能够证明，

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)d\xi(\tau,\gamma) \tag{3.65}$$

的零点几乎总是具有确定的密度，而且，适当地选取 K，能够使这密度任意的大。令选择的 K 为 K_D，使得这密度为 D。我们用 $Z_n(D,\gamma)$ 表示 $\int_{-\infty}^{\infty} K_D(t+\tau)d\xi(\tau,\gamma)$ 由 $-\infty$ 到 ∞ 的零点序列，$-\infty<n<\infty$。当然，在决定这些零点时，我们所确定的 n 附加了一整常数。

令 $T(t,\mu)$ 为连续变数 t 的任一时间序列，而 μ 是这时间序列的分布参数，均匀分布在(0,1)上。再令

$$T_D(t,\mu,\gamma) = T[t-Z_n(D,\gamma),\mu], \tag{3.66}$$

式中的 Z_n 取正好先于 t 的一个零点。可以证明，对于 t 数值的任何有限集 $t_1,t_2,\cdots,t_v$，$T_D(t_\kappa,\mu,\gamma)$，$(\kappa=1,2,\cdots,v)$ 的同时分布当 $D\to\infty$ 时几乎对所有的 μ 值都趋于同一 t_κ 的 $T(t_\kappa,\mu)$ 的同时分布。但是，$T_D(t,\mu,\gamma)$ 完全由 t,μ,D 和 $\xi(\tau,\gamma)$ 决定。因此，对于给定的 D 和 μ，把 $T_D(t,\mu,\gamma)$ 直接表示为(3.46)形式的时间序列，或者用这种或那种方法把它表示为具有(3.46)形式的分布的极限分布（在上述的广泛意义上）的时间序列，都不是不适当的尝试。

必须承认，这是一个有待将来来完成的研究，而不应当认为它就已经完成了。但是，照作者看来，为了合理而无矛盾地处理许多和非线性预测、非线性滤波、非线性情况下信息传递的估价、高密度气体理论和湍流理论等有关的问题，进行这个研究是最有希望的。上述这些问题也许都是通信工程中最迫切需要解决的。

① 这就是柯普曼的混合性，它是证明统计学各态历经假设的充分和必要条件。

我们现在来讨论(3.34)形式的时间序列的预测问题。我们看到,这种时间序列的一个唯一的独立统计参数是 $\Phi(t)$,即(3.35)式;这意味和 K 相关连的唯一有意义的量是

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+t)\mathrm{d}s . \tag{3.67}$$

式中 K 当然取实数值。

我们作傅里叶变换

$$K(s) = \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}\omega . \tag{3.68}$$

知道 $K(s)$后就能知道 $k(\omega)$,反之亦真。于是,

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau)\mathrm{d}s = \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)k(-\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}\omega . \tag{3.69}$$

因此,关于 $\Phi(\tau)$的知识和关于 $k(\omega)k(-\omega)$的知识是等价的。但由于 $K(s)$取实数值,我们有

$$K(s) = \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega s}\mathrm{d}\omega , \tag{3.70}$$

即 $k(\omega)=k(-\omega)$. 因此,$|k(\omega)|^2$ 是一已知函数,这意味 $\log|k(\omega)|$的实数部分是一已知函数。如果把这实数部分写成

$$F(\omega) = \mathscr{R}\{\log[k(\omega)]\} , \tag{3.71}$$

则决定 $K(s)$的问题就相当于决定 $\log[k(\omega)]$的虚数部分的问题。这个问题的解一般是不定的,除非对 $k(\omega)$进一步加以一定限制。我们考虑如下形式的限制:对于上半平面的 ω 函数 $\log k(\omega)$是解析的,而且上升速度足够的小。为了满足这个限制条件,我们假设 $k(\omega)$和$[k(\omega)]^{-1}$在整个实数轴上是代数地增长。这时,$[F(\omega)]^2$将是一偶函数,而且至多是对数地趋于无限大,并存在柯西主值

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(u)}{u-\omega}\mathrm{d}u . \tag{3.72}$$

由(3.72)决定的变换叫做希尔伯特变换,它把 $\cos\lambda\omega$ 变为 $\sin\lambda\omega$,把 $\sin\lambda\omega$。变为 $-\cos\lambda\omega$。因此,$F(\omega)+\mathrm{i}G(\omega)$是一形式为

$$\int_0^{\infty} \mathrm{e}^{\mathrm{i}\lambda\omega}\mathrm{d}[M(\lambda)] \tag{3.73}$$

的函数,而且对应的 $\log|k(\omega)|$满足我们对它在下半平面的要求。令

$$k(\omega) = \exp[F(\omega)+\mathrm{i}G(\omega)] , \tag{3.74}$$

我们能证明:在很一般的条件下,函数 $k(\omega)$具有使(3.68)中定义的 $K(s)$对所有负的变数值为零的性质。因此,

$$f(t,\gamma) = \int_{t}^{\infty} K(t+\tau)\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma) \tag{3.75}$$

另一方面,我们能证明:适当地决定 N_n 后,$1/k(\omega)$可以写成如下形式:

$$\lim_{n\to\infty}\int_0^{\infty} \mathrm{e}^{\mathrm{i}\lambda\omega}\mathrm{d}N_n(\lambda) ; \tag{3.76}$$

而且,做到这点只需使

$$\xi(\tau,\gamma) = \lim_{n\to\infty}\int_0^{t}\mathrm{d}t\int_{t}^{\infty} Q_n(t+\sigma)f(\sigma,\gamma)\mathrm{d}\sigma \tag{3.77}$$

式中 Q_n 必须具有如下形式上的性质:

$$f(t,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty}K(t+\tau)\mathrm{d}\tau\int_{-\tau}^{\infty}Q_n(\tau+\sigma)f(\sigma,\gamma)\mathrm{d}\sigma\,. \tag{3.78}$$

一般说,我们有

$$\psi(t)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty}K(t+\tau)\mathrm{d}\tau\int_{-\tau}^{\infty}Q_n(\tau+\sigma)\psi(\sigma)\mathrm{d}\sigma\,, \tag{3.79}$$

或者,如果像(3.68)那样写出

$$K(s)=\int_{-\infty}^{\infty}k(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega s}\mathrm{d}\omega\,,$$

$$Q_n(s)=\int_{-\infty}^{\infty}q_n(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega s}\mathrm{d}\omega\,,$$

$$\psi(s)=\int_{-\infty}^{\infty}\Psi(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega s}\mathrm{d}\omega\,, \tag{3.80}$$

即

$$\Psi(\omega)=\lim_{n\to\infty}(2\pi)^{3/2}\Psi(\omega)q_n(-\omega)k(\omega)\,, \tag{3.81}$$

因此,

$$\lim_{n\to\infty}q_n(-\omega)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}k(\omega)}\,. \tag{3.82}$$

这个结果对于求得一个在形式上与频率关联的而不是与时间关联的预测运算子很有用处。

这样,$\xi(t,\gamma)$的过去和现在[确切地说,“微分”$\mathrm{d}\xi(t,\gamma)$的过去和现在]决定 $f(t,\gamma)$的过去和现在,反之亦真。

如果 $A>0$,则

$$\begin{aligned}f(t+A,\gamma)&=\int_{-t-A}^{\infty}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)\\&=\int_{-t-A}^{-t}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)\\&\quad+\int_{-t}^{\infty}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)\,.\end{aligned} \tag{3.83}$$

这里,最后表示式中的第一项依赖于 $\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)$的变程,但即使我们知道了 $\sigma\leqslant t$ 的 $f(\sigma,\gamma)$,也不能由此得到有关这变程的任何知识。第一项与第二项完全无关。它的均方值为

$$\int_{-t-A}^{-t}[K(t+A+\tau)]^2\mathrm{d}\tau=\int_0^A[K(\tau)]^2\mathrm{d}\tau\,, \tag{3.84}$$

这说明我们有关它的知识都是统计的。可以证明,均方值(3.84)是高斯分布。它是$f(t+A,\gamma)$的可能的最优预测的误差。

最优预测本身是(3.83)右端第二项,

$$\begin{aligned}&\int_{-t}^{\infty}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)\\&=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\tau\int_{-\tau}^{\infty}Q_n(\tau+\sigma)f(\sigma,\gamma)\mathrm{d}\sigma\end{aligned} \tag{3.85}$$

如果现在令

$$k_A(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty}K(t+A)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}t\,, \tag{3.86}$$

并将运算子(3.85)应用于 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$,则得

$$\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty}K(t+A+\tau)\mathrm{d}\tau\int_{\tau}^{\infty}Q_n(\tau+\sigma)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\sigma}\mathrm{d}\sigma$$
$$= A(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}; \tag{3.87}$$

这使我们得到[如同(3.81)那样]

$$A(\omega)=\lim_{n\to\infty}(2\pi)^{3/2}q_n(-\omega)k_A(\omega)=k_A(\omega)/k(\omega)$$
$$=\frac{1}{2\pi k(\omega)}\int_A^{\infty}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega(t-A)}\mathrm{d}t\int_{-\infty}^{\infty}k(u)\mathrm{e}^{\mathrm{i}ut}\mathrm{d}u. \tag{3.88}$$

这就是最优预测运算子的频率形式表示。

在(3.34)那样的时间序列场合，滤波问题与预测问题有非常密切的关系。设消息加噪声的形式为

$$m(t)+n(t)=\int_0^{\infty}K(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)\ ; \tag{3.89}$$

而消息的形式为

$$m(t)=\int_{-\infty}^{\infty}Q(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)$$
$$+\int_{-\infty}^{\infty}R(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\delta) \tag{3.90}$$

式中 γ 和 δ 彼此独立地分布在(0,1)上，则由关于 $m(t+a)$ 的过去和现在的知识得到的 $m(t+a)$ 可预测部分显然为

$$\int_0^{\infty}Q(\tau+a)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)\ , \tag{3.901}$$

而这预测的均方误差为

$$\int_{-\infty}^{a}[Q(\tau)]^2\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty}[R(\tau)]^2\mathrm{d}\tau. \tag{3.902}$$

此外，假定我们已知下列诸量：

$$\begin{aligned}
\phi_{22}(t)&=\int_0^1\mathrm{d}\gamma\int_0^1\mathrm{d}\delta n(t+\tau)n(\tau)\\
&=\int_{-\infty}^{\infty}[K(|t|+\tau)-Q(|t|+\tau)][K(\tau)-Q(\tau)]\mathrm{d}\tau\\
&=\int_0^{\infty}[K(|t|+\tau)-Q(|t|+\tau)][K(\tau)-Q(\tau)]\mathrm{d}\tau\\
&+\int_{|t|}^{0}[K(|t|+\tau)-Q(|t|+\tau)][-Q(\tau)]\mathrm{d}\tau\\
&+\int_{-\infty}^{-|t|}Q(|t|+\tau)Q(\tau)\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty}R(|t|+\tau)R(\tau)\mathrm{d}\tau\\
&=\int_0^{\infty}K(|t|+\tau)K(\tau)\mathrm{d}\tau-\int_{|t|}^{\infty}K(|t|+\tau)Q(\tau)\mathrm{d}\tau\\
&+\int_{-\infty}^{\infty}Q(|t|+\tau)Q(\tau)\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty}R(|t|+\tau)R(\tau)\mathrm{d}\tau,
\end{aligned} \tag{3.903}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{11}(\tau)&=\int_0^1\mathrm{d}\gamma\int_0^1\mathrm{d}\delta m(|t|+\tau)m(\tau)\\
&=\int_{-\infty}^{\infty}Q(|t|+\tau)Q(\tau)\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty}R(|t|+\tau)R(\tau)\mathrm{d}\tau,
\end{aligned} \tag{3.904}$$

$$\phi_{12}(\tau)=\int_0^1\mathrm{d}\gamma\int_0^1\mathrm{d}\delta m(t+\tau)n(\tau)$$

$$= \int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta m(t+\tau)[m(\tau)+n(\tau)] - \phi_{11}(\tau)$$

$$= \int_0^1 d\gamma \int_{-t}^{\infty} K(\sigma+t) d\xi(\tau-\sigma,\gamma) \int_{-t}^{\infty} Q(\tau) d\xi(\tau-\sigma,\gamma) - \phi_{11}(\tau)$$

$$= \int_{-t}^{\infty} K(t+\tau) Q(\tau) d\tau - \phi_{11}(\tau) . \tag{3.905}$$

上述三个量的傅里叶变换分别为

$$\left.\begin{aligned} \Phi_{22}(\omega) &= |k(\omega)|^2 + |q(\omega)|^2 - q(\omega)\overline{k(\omega)} - k(\omega)\overline{q(\omega)} \\ &\quad + |r(\omega)|^2 , \\ \Phi_{11}(\omega) &= |q(\omega)|^2 + |r(\omega)|^2 , \\ \Phi_{12}(\omega) &= k(\omega)\overline{q(\omega)} - |q(\omega)|^2 - |r(\omega)| , \end{aligned}\right\} \tag{3.906}$$

式中

$$\left.\begin{aligned} k(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K(s) e^{-i\omega s} ds , \\ q(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \overline{Q(s)} e^{-i\omega s} ds , \\ r(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} R(s) e^{-i\omega s} ds . \end{aligned}\right\} \tag{3.907}$$

于是我们得到

$$\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{12}(\omega) + \overline{\Phi_{12}(\omega)} + \overline{\Phi_{22}(\omega)} = |k(\omega)|^2 \tag{3.908}$$

和

$$q(\omega)\overline{k(\omega)} = \Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega) , \tag{3.909}$$

这里为对称起见，我们曾把 $\Phi_{21}(\omega)$ 写成了 $\Phi_{21}(\omega) = \overline{\Phi_{12}(\omega)}$。和我们前面用(3.74)来定义 $k(\omega)$ 一样，我们现在能够用(3.908)决定 $k(\omega)$。这里，以 $\Phi_{11}(t) + \Phi_{22}(t) + 2\mathscr{R}[\Phi_{12}(t)]$ 作 $\Phi(t)$。由此得到

$$q(\omega) = \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}} . \tag{3.910}$$

因而，

$$Q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}} e^{i\omega t} d\omega ; \tag{3.911}$$

因此，具有最小均方误差的 $m(t)$ 的最优预测为

$$\int_0^{\infty} d\xi(t-\tau,\gamma) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}} e^{i\omega(t+a)} d\omega . \tag{3.912}$$

把上式和(3.89)结合起来，并应用类似于用来得到(3.88)的推演，那么，作用于 $m(t) + n(t)$ 上的，使我们能得到 $m(t+a)$ 的"最优"表示式的运算子，如果用频率尺度写出将是

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)} \int_a^{\infty} e^{-i\omega(t-a)} dt \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi_{11}(u) + \Phi_{21}(u)}{\overline{k(u)}} e^{iut} du . \tag{3.913}$$

这个运算子是电机工程师称为滤波器的特性运算子。量 a 是滤波器的滞后，它可以是正数，也可以是负数；当它为负时，$-a$ 叫做超前。我们总可以以任意高的精确度造出和(3.913)相当的装置。但关于制造这种装置的细节，电机工程专家会比本书的读者更

感必要。这些细节可以在任何有关的文献中找到①。

滤波的均方差(3.902)可以表示成具有无限大滞后($a=-\infty$)的滤波的均方差之和：

$$
\begin{aligned}
\int_{-\infty}^{\infty}[R(\tau)]^2\mathrm{d}\tau &= \Phi_{11}(0)-\int_{-\infty}^{\infty}[Q(\tau)]^2\mathrm{d}\tau \\
&= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{11}(\omega)\mathrm{d}\omega-\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{k(\omega)}\right|^2\mathrm{d}\omega \\
&= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\Phi_{11}(\omega)-\frac{|\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)|^2}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}\right\}\mathrm{d}\omega \\
&= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\begin{vmatrix}\Phi_{11}(\omega)\Phi_{12}(\omega)\\ \Phi_{21}(\omega)\Phi_{22}(\omega)\end{vmatrix}}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}\mathrm{d}\omega\ ;
\end{aligned}
\tag{3.914}
$$

以及和滞后 a 有关的那一部分

$$
\int_{-\infty}^{a}[Q(\tau)]^2\mathrm{d}t=\int_{-\infty}^{a}\mathrm{d}t\left|\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{k(\omega)}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}\omega\right|^2
\tag{3.915}
$$

之和。我们看到，滤波的均方差是滞后 a 的单调下降函数。

在消息加噪声的场合下，另一个由布朗运动引出的有趣问题是信息传递率的问题。为简单起见，我们考虑消息和噪声不相关的情形，即

$$
\Phi_{12}(\omega)\equiv\Phi_{21}(\omega)\equiv 0\ .
\tag{3.916}
$$

在这情形下，我们来考察

上述三个量的傅里叶变换分别为

$$
\begin{aligned}
m(t) &= \int_{-\infty}^{\infty}M(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)\ , \\
n(t) &= \int_{-\infty}^{\infty}N(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\delta)\ .
\end{aligned}
\tag{3.917}
$$

式中 γ 和 δ 的分布彼此独立。如果得知 $m(t)+n(t)$ 在区域$(-A,A)$上，试问由此获得多少关于 $m(t)$ 的信息？注意，我们应当料想到，所求的这个信息量和我们得知

$$
\int_{-A}^{A}M(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)
\tag{3.918}
$$

的所有数值时而获得的关于

$$
\int_{-A}^{A}M(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)+\int_{-A}^{A}N(\tau)\mathrm{d}\xi(t-\tau,\delta)
\tag{3.919}
$$

的信息量相差不多，这里 γ 和 δ 的分布也是彼此独立的。另一方面，可以证明，(3.918)的第 n 个傅里叶系数具有和其他一切傅里叶系数无关的高斯分布，而且它的均方值正比于

$$
\left|\int_{-A}^{A}M(\tau)\exp\left(\mathrm{i}\,\frac{\pi n\tau}{A}\right)\mathrm{d}\tau\right|^2.
\tag{3.920}
$$

因此，由(3.09)，关于 M 的全部信息量为

$$
\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{1}{2}\log_2\frac{\left|\int_{-A}^{A}M(\tau)\exp\left(\mathrm{i}\,\frac{\pi n\tau}{A}\right)\mathrm{d}\tau\right|^2+\left|\int_{-A}^{A}N(\tau)\exp\left(\mathrm{i}\,\frac{\pi n\tau}{A}\right)\mathrm{d}\tau\right|^2}{\left|\int_{-A}^{A}N(\tau)\exp\left(\mathrm{i}\,\frac{\pi n\tau}{A}\right)\mathrm{d}\tau\right|^2}\ ,
\tag{3.921}
$$

① 特别要提到的是最近李郁荣博士的论文。

而能量传递的时间密度则为这个量用 2A 除。当 $A \to \infty$ 时，(3.921)趋于

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}u \log_2 \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau)\exp iu\tau \mathrm{d}\tau\right|^2 + \left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)\exp iu\tau \mathrm{d}\tau\right|^2}{\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)\exp iu\tau \mathrm{d}\tau\right|^2} \tag{3.922}$$

上述场合下的信息传递率的这个结果，是由作者和仙农得到的。我们看到，它不仅决定于传递消息的有效频带宽度，而且还决定于噪声的振幅大小。事实上，它和用来测定每个人的听力和听力损失量的听力损失图有密切关系。在这种图中，横轴表示频率数，下边界的纵坐标表示听阈强度的对数——我们把它叫做接收系统内部噪声强度的对数，而上边界的纵坐标则表示系统能接收的最大消息强度的对数。因此，上下边界间的面积是一个具有(3.922)量纲的量，因而可以取作耳朵能够忍受的信息传递率的测度。

关于和布朗运动有线性关系的消息理论，具有许多重要的变形。(3.88)，(3.914)和(3.922)都是重要的公式；当然，解释这些公式所必需的定义也是重要的。这个理论目前有如下一系列的变形。首先，当消息和噪声，是由有布朗运动作用的线性共振器所产生出来时，由这个理论可以作出预测器和滤波器的最优设计；但在大多数通常情况下，我们只能得到预测器和滤波器的可能设计。虽然这不能说是绝对最优的设计，但就对于进行线性操作的装置说，则是使预测和滤波的均方差为最小的设计。然而，一般说，我们要考虑某些非线性装置，因为它们工作得比任何线性装置还要好。

其次，上面考虑的时间序列是简单时间序列，其中只有一个变量依赖于时间。还有一种多重时间序列，其中有许多变量同时依赖于时间；这种时间序列在经济学、气象学等部门中是特别重要的。逐日作出的美国总天气图就是这种时间序列。对于这样的时间序列，我们必须同时把许多函数展成频率形式，而像(3.35)和(3.70)后面讨论的 $|k(\omega)|^2$ 那样的二次量，则必须用成对量的行列，即用矩阵来代替。这时，运用使 $k(\omega)$ 在其复平面内满足某些附加条件的方法，由 $|k(\omega)|^2$ 来决定 $k(\omega)$，成为一个十分困难的问题，这特别由于矩阵乘法是一个不可交换运算的缘故。但是，关于多元理论的这个问题已经由克耐因(Krein)和作者解决了，至少充分地解决了。

多元理论是上述一元理论的复杂化。除此而外，还有一种和一元理论有密切关系的理论，它是一元理论的简单化。这就是关于离散时间序列的预测，滤波和信息量的理论。离散时间序列是参数为 α 的函数 $f_n(\alpha)$ 的序列，其中 n 跑到 $-\infty$ 到 ∞ 的一切整数值。和前面一样，量 α 是分布参数，可以认为它均匀地在(0,1)上变动。如果当 n 变为 $n+\nu$(ν 取整数)时，时间序列的统计性质不变，我们就把它叫做处在统计平衡的时间序列。

离散时间序列的理论在许多方面都比连续时间序列理论更简单。例如，要做到它由一系列独立选择来决定就比较容易。每一项(在混合的场合下)都可以表示成前面各项与某个和前面各项无关的、均匀分布在(0,1)上的量的组合，这些独立量的序列，就代替了在连续场合下起十分重要作用的布朗运动的作用。

如果 $f_n(\alpha)$ 是一处在统计平衡的时间序列，而且是度量可迁的，则它的自相关系数是

$$\phi_m = \int_0^1 f_m(\alpha) f_0(\alpha) \mathrm{d}\alpha , \tag{3.923}$$

并且几乎对所有的 α 我们都有

$$\phi_m = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_0^N f_{k+m}(\alpha) f_k(\alpha)$$

$$= \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_0^N f_{-k+m}(\alpha) f_{-k}(\alpha) . \tag{3.924}$$

我们令

$$\phi_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\omega) e^{in\omega} d\omega \tag{3.925}$$

或

$$\Phi(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} \phi_n e^{-in\omega} . \tag{3.926}$$

令

$$\frac{1}{2}\log\Phi(\omega) = \sum_0^{\infty} p_n \cos n\omega . \tag{3.927}$$

再令

$$G(\omega) = \frac{p_0}{2} + \sum_1^{\infty} p_n e^{in\omega} . \tag{3.928}$$

令

$$e^{G(\omega)} = k(\omega) , \tag{3.929}$$

则在很一般的条件下，$k(\omega)$将是一个在单位圆内无零点或奇点的函数在单位圆上的边界值。这里，ω 表示单位圆上点的偏角。我们将有

$$|k(\omega)|^2 = \Phi(\omega) . \tag{3.930}$$

现在，设具有超前 ν 的 $f_n(\alpha)$的最优线性预测为

$$\sum_0^{\infty} f_{n-\nu}(\alpha) W_\nu , \tag{3.931}$$

则得到

$$\sum_0^{\infty} W_\mu e^{i\mu\omega} = \frac{1}{2\pi k(\omega)} \sum_{\mu=\nu}^{\infty} e^{i(\mu-\nu)\omega} \int_{-\pi}^{\pi} k(u) e^{-i\mu u} du . \tag{3.932}$$

它和(3.88)相当。注意，如果令

$$k_\mu = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} k(u) e^{-i\mu u} du , \tag{3.933}$$

则

$$\sum_0^{\infty} W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega} \frac{\sum_\nu^{\infty} k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^{\infty} k_\mu e^{i\mu\omega}} = e^{-i\nu\omega}\left[1 - \frac{\sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^{\infty} k_\mu e^{i\mu\omega}}\right] . \tag{3.934}$$

在很一般的场合下，我们能设

$$\frac{1}{k(\omega)} = \sum_0^{\infty} q_\mu e^{i\mu\omega} , \tag{3.935}$$

这显然是上述作成 $k(\omega)$的方法带来的结果。这时，(3.934)变为

$$\sum_0^{\infty} W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega}\left(1 - \sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega} \sum_0^{\infty} q_\lambda e^{i\lambda\omega}\right) . \tag{3.936}$$

特别，当 $\nu=1$ 时，

$$\sum_{0}^{\infty} W_{\mu} e^{i\mu\omega} = e^{-i\omega}\left(1 - k_0 \sum_{0}^{\infty} q_{\lambda} e^{i\lambda\omega}\right) \tag{3.937}$$

或

$$W_{\mu} = -q_{\lambda+1} k_0. \tag{3.938}$$

因此，对于先一步的预测 $f_{n+1}(\alpha)$，其最优值为

$$-k_0 \sum_{0}^{\infty} q_{\lambda+1} f_{n-\lambda}(\alpha) \; ; \tag{3.939}$$

利用逐步预测过程，我们就能解决全部离散时间序列线性预测的问题。像连续场合中一样，如果

$$f_n(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} K(n-\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\alpha) \;, \tag{3.940}$$

我们上面得到的这个预测在所有可能的方法中是最优的预测。

关于把滤波问题由连续场合过渡到离散场合，几乎只要遵循和前面相同的讨论。这时，表示最优滤波器频率特性的(3.913)变为如下形式：

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)} \sum_{\nu=a}^{\infty} e^{-i\omega(\nu-a)} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[\Phi_{11}(u) + \Phi_{21}(u)]e^{iu\nu}\,\mathrm{d}u}{\overline{k(u)}} \;, \tag{3.941}$$

式中所有项的定义都和连续场合的相同，只是所有对 ω 或 u 的积分限都是从 $-\pi$ 到 π 而不是从 $-\infty$ 到 ∞，对所有 ν 的求和是离散求和，而不是对 t 的积分求和。通常，离散时间序列的滤波器要做成一个用电器在物理上加以实现的装置，不如统计学家用它作为一种数学程序，从非纯粹统计数据求得最优结果那样来得容易。

最后，在有噪声

$$\int_{-\infty}^{\infty} M(n-\tau)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma) \;, \tag{3.942}$$

存在的场合下，当 γ 和 δ 的分布彼此独立时，离散时间序列的信息传递率的形式为

$$\int_{-\infty}^{\infty} N(n-\tau)\,\mathrm{d}\xi(t,\delta) \;, \tag{3.943}$$

它完全与(3.922)相当；即这时的信息传递量为

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \mathrm{d}u \log_2 \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau)e^{iu\tau}\,\mathrm{d}\tau\right|^2 + \left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)e^{iu\tau}\,\mathrm{d}\tau\right|^2}{\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)e^{iu\tau}\,\mathrm{d}\tau\right|^2} \;, \tag{3.944}$$

式中，在区间 $(-\pi,\pi)$ 上，

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau)e^{iu\tau}\,\mathrm{d}\tau\right|^2 \tag{3.945}$$

表示消息的功率按频率的分布，而

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)e^{iu\tau}\,\mathrm{d}\tau\right|^2 \tag{3.946}$$

表示噪声功率按频率的分布。

这里发展的统计理论，要求我们对所观测的时间序列的过去具有充分的知识。但无论在什么场合，我们都不能满足这个要求，因为我们的观测不能追溯到无限的过去。为了超出这个范围，使我们的理论发展成为一个实用的统计理论，必须推广现有的抽样方

法。作者和其他等人[①]已经开始这方面的研究。我们发现，或者由于必须使用拜意斯定律（Bayes' Law），或者由于必须使用似然理论（theory of likelihood）[②]的术语技巧，都给这个研究带来了全部的复杂性，似然理论似乎能避免使用拜意斯定律的必要，但实际上却是把使用这定律的责任推诸实际从事这方面工作的统计学家，或其他最后利用其结果的人。与此同时，理论统计学家却完全可以理直气壮地指出，他所说的话都是完全严密和无可非议的。

最后，在结束本章时，还应当讨论一下现代量子力学。这个讨论说明时间序列理论伸入到近代物理学的最高点。在牛顿物理学中，物理现象序列完全由它的过去所决定，特别，完全由任一瞬间所有的位置和动量的决定所决定。在全部吉布斯理论中，这一点仍然是正确的，如果整个宇宙的多重时间序列能完全决定，则任一瞬间的关于所有位置和动量的知识将决定整个未来。仅仅因为还有一些坐标和动量还不知道，还没有观察到，我们实际研究的时间序列才具有一种混合的性质，对这种性质，我们在本章的由布朗运动得到的时间序列中已经很熟悉了。海森伯对物理学的巨大贡献就在于，他用另一种世界来代替上述吉布斯的仍然是准牛顿式的世界，对于这另种世界，时间序列无法归结为一个在时间进展中具有决定论发展线索的系综。在量子力学中，单个系统的全部过去并不以绝对的方式决定其未来，而仅决定该系统未来可能状态的分布。古典物理为了获得系统整个过程的知识所必需的那些量，只能不精确地近似地而不能同时精确地加以观测。但是，在古典物理要求的精确度范围内，（已经证明这个范围在实验上是可以适用的），这样的近似观测还是足够精确的。观测动量及其共轭位置的条件是互不相容的。为了尽可能精确地观测系统的位置，我们必须借助光或电子波或其他类似的具有高分辨本领的短波长的方法来进行观测。但是，光具有仅仅和它的频率有关的粒子性，用高频光照射物质，意味着使它的动量发生随频率增加而增大的动量变化。另一方面，低频光可以使被照射粒子的动量变化小，但它没有能明晰指示粒子位置的足够的分辨本领。中间频率的光对位置和动量二者提供的都是模糊的估计。一般说，没有任何一组可以设想的观测，它能提供我们关于系统的过去的足够信息，而这些信息能提供我们关于系统的未来的完全信息。

虽然如此，如同在一切时间序列系综的场合中一样，我们这里发展的信息量理论对于量子力学也能适用，因而关于熵的理论也能适用。但由于我们目前处理的时间序列是混合性的（即使在数据尽可能的完全时也是如此），我们发现我们的系统并没有绝对势垒：在时间的过程中，系统的任一状态都能而且一定会变化到另一状态。但是，发生这种变化的概率归根到底决定于两个状态的相对概率或测度。对于那些能通过多次变化而变化为自身的状态来说，这种状态变化的概率特别高，用量子理论家的话说，也就是对于

---

① Wiener，N. 和 Doob 的著作，即将由纽约的 John Wiley 公司出版。

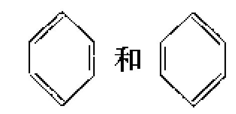
② 见 J. von Neumann 与 R. A. Fisher 的著作。

× 虽然维纳写成本书已将十年，这里的脚注和序中所提到的那种合写的著作并没有出版（这是维纳到日本来的时候弄明白的）。但是 Doob 个人著的下面一本书却出版了。

Doob，J. L.，"Stochastic Processes"，John，Wiley，1952

这本书的最后一章讲的是预测理论。　　日译者注

那些具有高内部共振或高量子简并性的状态，这些状态的变化概率特别高。苯环就是一个这样的例子，因为它有两个等价的状态：



这可以使我们想象：一个系统的各个构成部分可以按不同的方式相互紧密地结合起来，许多氨基酸的混合物结合为各种蛋白质链就是这种情形，至于有许多链是相同链的情况，则当它们进入彼此密切缔合的阶段时，它们的情况要比具有不同链的情况更为稳定。海登（Haldane）曾尝试提出，这可能就是基因和病毒自身繁殖的途径；虽然他没有把这个提议作为最后结论那样地肯定下来，但我想，我们没有什么理由不把它作为正式的假说而加以保留，如海登本人所指出的，由于量子理论中任何单个粒子都没有明晰的个体性，所以对于由一个基因以这种方式繁殖成两个基因的情形，我们不可能很准确地说这两个基因样品中，哪一个是主型，哪一个是模型。

我们知道，这种同样性质的共振现象在生命体中是经常出现的。生特-乔治（Szent-Györge）曾指出这种现象在肌肉结构中的重要性。高共振物质十分普遍地都有一种非常的储藏能量和信息的能力，这样的储藏在肌肉收缩时肯定是发生的。

再有，和生殖有关的同样现象，也许可以用不同种的生命体中化学物质不寻常的特殊性，甚至用同种个体间化学物质不寻常的特殊性来加以解释。这种考虑可能在免疫学中非常重要。

第四章

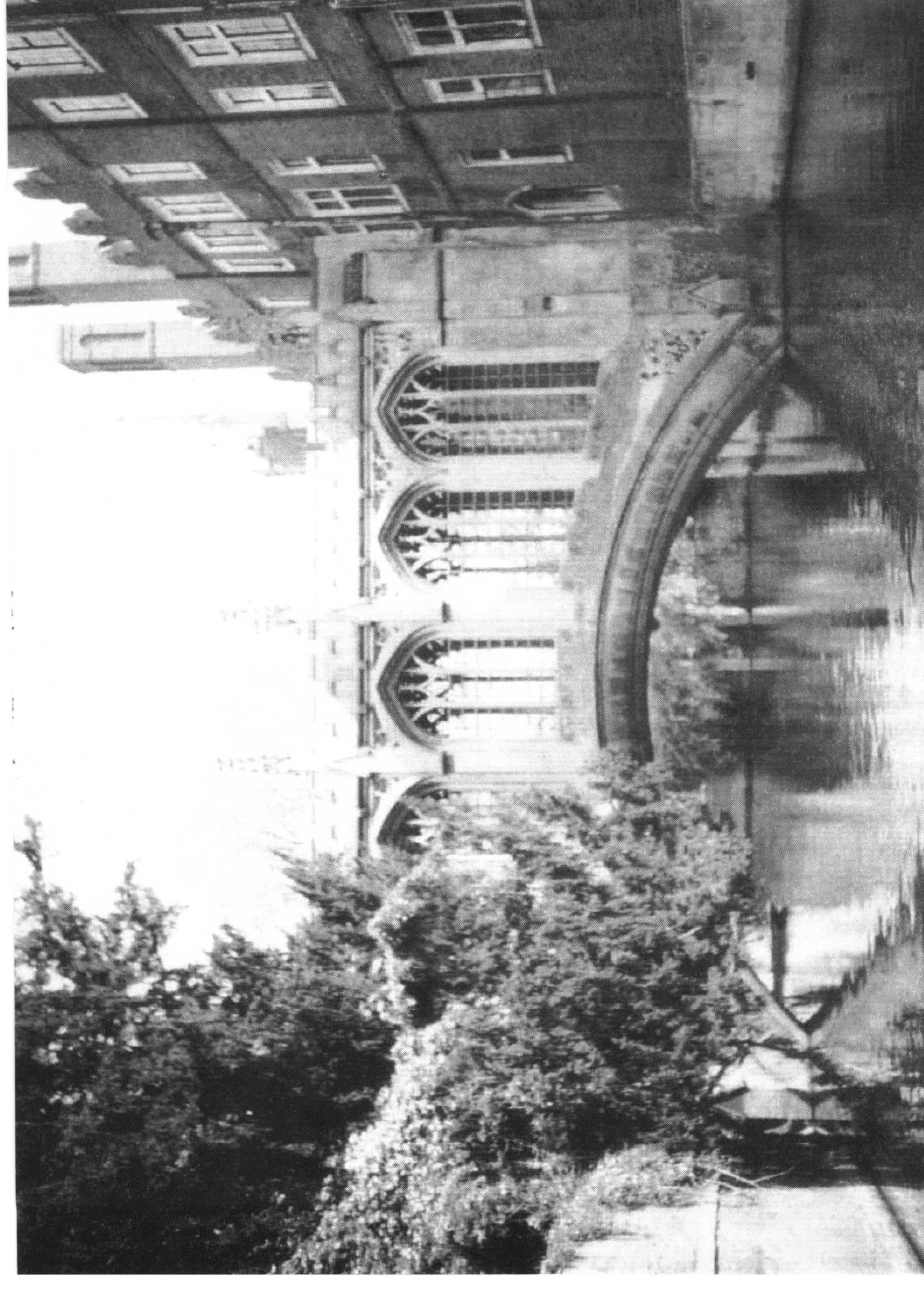
反馈和振荡

· IV Feedback and Oscillation ·



我向来认为，欧洲文化比任何伟大的东方文化更加优越，只是历史上暂时的插曲。因此，我迫切希望亲眼看看这些欧洲以外的国家，通过直接考察来了解他们的生活方式和思维方式。在这一点上，我妻子完全赞同，民族和种族的偏见对于她，就像对于我一样，始终是格格不入的。甚至连我的女儿们，也在我们的教育之下没有沾染上这些偏见。

——维纳



一个病人到精神病院来临诊，他并没有瘫痪，当他接到命令时还能移动下肢，然而，他苦于严重的病症，他在步行时呈现特殊的不准确的步态，两眼朝下，看着地面和足部，他每走一步腿都抬得很高，而且迈足过度，上身则落在后面，如果遮住他的两眼，他就要站立不住而踉跄倒地，这是怎么回事呢？

另一个病人也来临诊，当他安静地坐在椅中时，好像没有什么毛病。但是，如果给他一支香烟，在他企图接取这支烟时，他的手会摇摆不定而抓不到它。接着他的手又在另一侧作同样无益的摇摆，随后，第三次又摇摆回来，他的手一直就这样进行着无益而激烈的振荡。如果给他一杯水，当他把这杯水端到口边以前就会由于这些摇摆而泼空了。这又是怎么回事呢？

这两个病人都是苦于这种或那种形式的所谓运动失调。他们的肌肉是强壮的，而且很健康，但是不能调节自己的动作。第一个病人患的是脊髓痨。由于梅毒后遗症，他的通常用来传导各种感觉的脊髓后索等部位，遭到了损伤或破坏。他对外来消息的应答变得迟钝了，即使这些消息不是完全不起作用。他的关节、腱、肌肉和足底中的各个感受器，这些通常报告他下肢运动的位置和状态的器官，不能向中枢神经系统传送什么消息了，他对于有关其姿势的信息，不得不依靠两眼和内耳平衡器官。用生理学家的术语说，他丧失了本体感觉或运动神经感觉的重要部分。

第二个病人并没有丧失本体感觉。他受伤的部位是另外一个地方——小脑。他患的病叫小脑性震颤或目的性震颤。看来，小脑可能具有一种调节肌肉对本体感觉输入应答的机能，这种调节机能一旦发生障碍，其结果之一就是震颤。

由此可见，为了能对外界产生有效的动作，重要的不仅是我们必须具有良好的效应器，而且必须把效应器的动作情况恰当地回报给中枢神经系统，而这些报告的内容必须适当地和其他来自感官的信息组合起来，以便对效应器产生一个适当的调节输出。有些机械系统的情形与此十分相似。例如，让我们来考虑铁路上信号塔的情形。信号手控制着一组杠杆，它们能使信号机开发信号或停发信号，并调整转辙装置。可是，信号手不能盲目认为信号机和转辙器是服从他的命令的，说不定转辙器被牢牢冻住了，或者由于雪的负重使信号机臂弯曲了，这时，转辙器和信号机——信号手的效应器——的实际状态并不和他发出的命令相适应。为了避免这个偶发事件中所蕴藏的危险，每一个效应器，即转辙器或信号机，都必须附装一个向信号塔回报的自动回报器，把这些效应器的实际状态和动作情况报告给信号手，这和海军中的复述命令是机械地相当的：按照惯例，下级在接收命令时必须把命令对上级复述一遍，说明他已经听到了并了解了它。信号手就必须根据这种复述的命令动作。

我们注意，在上述系统中，信息传递和返回的过程（今后我们把它叫做反馈过程）是有人参与的。当然，信号手也不能完全自由行动；转辙器和信号机相互联结着，这种联结

◀剑桥的"过忧桥"，桥的一头是宿舍，另外一头是教室，你就知道它名字的来历了吧！过了这座桥要么就是天堂要么就是地狱，所以叫过忧。看来剑桥的学生和我们中国的一样对教室和宿舍存在特别不同的情感！

可以是机械的也可以是电的；此外，信号手没有选择某种危险组合的自由。但是，也有一些反馈过程没有人的因素参与。用来调节室温的普通恒温器，其调节过程就是这样一种反馈过程。有一种能使室温达到预定温度指标的装置；如果室内实际温度低于这个指标，恒温器就开动起来，使风门打开或使柴油的流量增加，把室温提高到预定的指标。反之，如果室温超过预定的指标，风门就关上，或者柴油的流量减少或中断。这样，室温将近似地保持在固定指标附近。要注意，这指标保持稳定的程度与恒温器设计的好坏有关，一个设计得不好的恒温器会使室温发生剧烈的振荡，如同患了小脑性震颤的人的运动一样。

另一个纯机械反馈系统的例子是蒸汽机的调整器，它能调节蒸汽机在负荷条件有改变时的速度，这种装置最初是由麦克斯韦加以研究的。在瓦特设计的原始形式的调整器中，包括两个联结在两根摆杆上的球，它们可以在旋转轴的两侧摆动。由于球本身的重量或由于弹簧力，这两个球有往下摆的趋势；而由于和转轴角速度有关的离心作用，它们要往上摆。因此，我们可以假定它们有一个平衡位置，这个位置也和角速度有关，球的位置的改变，经过另外的一些连接杆传递到转轴上的一个套筒，套筒位置的改变能使一个机件按照如下的方式动作：当蒸汽机速度降低而球下落时，它就打开气缸入口处的活阀；当蒸汽机的速度增加而球上升时，活阀就关上。我们注意，这个反馈倾向于反抗系统正在进行的动作，因此是负反馈。

我们已经有了稳定温度的负反馈例子，也有了稳定速度的负反馈例子，此外还有稳定位置的负反馈，例如船舶上操舵机的情形。由于舵轮的位置和舵的位置之间有一角度差，操舵机的动作总是要使舵的位置和舵轮的位置一致起来，随意动作中的反馈就是这种性质的反馈。当我们进行随意动作时，我们没有使某些肌肉运动的明确意图。为了完成特定的动作，譬如说当我们要接取一支香烟的时候，我们并不特别命令某一些肌肉来运动。而且实际上，我们一般也不知道要经过哪些肌肉的运动才能完成那个特定的动作。我们是根据某种表示动作尚未完成的量的大小来调节我们的动作的。

反馈到控制中心的信息，具有反抗被控制的量偏离控制指标的趋势，但是，这种反抗趋势可以按照不同方式依赖于偏离的大小。最简单的控制系统是线性控制系统，在这种控制系统中，效应器的输出和输入呈线性关系，当输入增加时，输出也成比例地增加，输出的读数用某种线性的装置来记录。这个读数简单地就是输入读数的分数。我们将在下面建立一个严格的理论，来描述这种装置的运转情形，特别是，来描述它的反常行为和在过载时发生的振荡的情形。

在本书中，我们尽量避免去运用许多数学符号和数学技巧，但在个别地方还不免要运用到，特别在上一章，同样，在这一章的以后部分中，对我们要严格处理的那些材料来说，数学符号则是合适的语言；否则就要用啰嗦的长篇大论来代替，这对于外行的人不见得更容易理解，只有对熟悉数学符号的读者才容易理解，因为他能把它们翻译成数学符号。当然，最好的折中办法就是使用数学符号再加以充分的口头说明。

令 $f(t)$ 是一个时间 t 的函数，t 从负无穷到无穷。这就是说，$f(t)$ 是一个对每一时刻 t 都有数值的量。在任一时刻 t，当 s 小于或等于 t 时，$f(s)$ 的值是可以求得的，但当 s 大于 t 时则不能求得。有些电的和机械的装置，其输出延迟一固定时间，就是说，对于输入

$f(t)$，我们得到的输出是 $f(t-\tau)$，这里 τ 是固定的延迟时间。

我们可以用几部这样的装置组合起来，得到输出 $f(t-\tau_1)$，$f(t-\tau_2)$，…，$f(t-\tau_n)$。对其中每个输出，我们都能乘上一个固定的正的或负的量。例如，我们可以用分压器使电压乘上一个小于1的固定正数，我们也不难设计一种自动平衡装置和放大器，使电压乘上一个负的或大于1的量。我们同样不难设计一种简单的电路，把各个电压连续相加起来，借助于这些，我们可以得到输出

$$\sum_1^n a_k f(t-\tau_k) . \tag{4.01}$$

随着延迟 τ_k 的数目的增加，并适当选择系数 a_k，这个输出可以无限接近于下列形式的输出

$$\int_0^\infty a(\tau) f(t-\tau) \mathrm{d}\tau . \tag{4.02}$$

在这个表示式中，应当注意积分限是从0到∞而不是从－∞到∞，这一点很重要，否则，我们就能用各种实际装置进行操作而得到 $f(t+\sigma)$，这里 σ 是正数，但这就涉及关于 $f(t)$ 的未来的知识；$f(t)$ 就可以是一个不由它的过去所决定的量，正像一架电车的坐标（由于转辙器可以使这条或那条轨道开断），不由他的过去所决定一样。当一个物理过程看来像运算子

$$\int_{-\infty}^\infty a(\tau) f(t-\tau) \mathrm{d}\tau \tag{4.03}$$

时，式中 $a(\tau)$ 对 τ 的负值不全为零，这意味对 $f(t)$ 不再有一个真正的唯一依赖于它的过去的运算子。有一些物理现象就是这种情形。例如，一个没有输入的动力学系统可能产生振幅不定的永久性振荡，甚至这个振荡的振幅可以增加到无限大。在这情形下，系统的未来不依赖于它的过去，而且，形式上我们可以求出一个依赖于系统的未来的运算子表示式。

从 $f(t)$ 得到(4.02)的运算，具有两个重要的性质：(1)它与时间原点的推移无关；(2)它是线性的。第一个性质可表述为：若

$$g(t) = \int_0^\infty a(\tau) f(t-\tau) \mathrm{d}\tau , \tag{4.04}$$

则有

$$g(t+\sigma) = \int_0^\infty a(\tau) f(t+\sigma-\tau) \mathrm{d}\tau . \tag{4.05}$$

第二个性质可表述为：若

$$g(t) = A f_1(t) + B f_2(t) , \tag{4.06}$$

则有

$$\int_0^\infty a(\tau) g(t-\tau) \mathrm{d}\tau = A\int_0^\infty a(\tau) f_1(t-\tau) \mathrm{d}\tau + B\int_0^\infty a(\tau) f_2(t-\tau) \mathrm{d}\tau . \tag{4.07}$$

可以证明：在适当意义上说，每个作用于 $f(t)$ 的过去的运算子，如果它是线性的而且在时间原点推移下不变，它就具有(4.02)的形式，或者是这种形式的运算子的一个序列的极限。例如，一个具有这些性质的运算子运算于 $f(t)$ 的结果为 $f'(t)$，而

$$f'(t)=\lim_{\varepsilon\to 0}\int_0^\infty \frac{1}{\varepsilon^2}a\left(\frac{\tau}{\varepsilon}\right)f(t-\tau)\mathrm{d}\tau\ , \tag{4.08}$$

式中

$$a(x)=\begin{cases}1\ (0\leqslant x<1);\\ -1\ (1\leqslant x<2);\\ 0\ (2\leqslant x).\end{cases} \tag{4.09}$$

如我们在前面所看出的，由函数 e^{zt} 组成的函数 $f(t)$ 的集合，对于运算子(4.02)来说是特别重要的，因为

$$e^{z(t-\tau)}=e^{zt}\cdot e^{-z\tau}, \tag{4.10}$$

那么延迟运算子就变成一个仅仅依赖于 z 的乘子，于是，(4.02)变为

$$e^{zt}\int_0^\infty a(\tau)e^{-z\tau}\mathrm{d}\tau\ , \tag{4.11}$$

它也是一个仅仅依赖于 z 的倍加运算子。表示式

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-z\tau}\mathrm{d}\tau=A(z) \tag{4.12}$$

叫做运算子(4.02)的频率函数表示式。如果取 Z 为复数 $x+\mathrm{i}y$，这里 x 和 y 都是实数，则这个表示式变为

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-x\tau}e^{-\mathrm{i}y\tau}\mathrm{d}\tau\ , \tag{4.13}$$

因此，由著名的施瓦兹(Schwarz)积分不等式，若 $y>0$，且

$$\int_0^\infty |a(\tau)|^2\mathrm{d}\tau<\infty\ , \tag{4.14}$$

我们就有

$$|A(x+\mathrm{i}y)|\leqslant\left[\int_0^\infty |a(\tau)|^2\mathrm{d}\tau\int_0^\infty e^{-2x\tau}\mathrm{d}\tau\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\left[\frac{1}{2x}\int_0^\infty |a(\tau)|^2\mathrm{d}\tau\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{4.15}$$

这就是说，$A(x+\mathrm{i}y)$ 是每个半平面 $x\geqslant\epsilon>0$ 上复变数 $x+\mathrm{i}y$ 的有界全纯函数，而 $A(\mathrm{i}y)$ 在某种确定意义上则表示这个函数的边界值。

令

$$u+\mathrm{i}v=A(x+\mathrm{i}y)\ , \tag{4.16}$$

式中 u 和 v 是实数。这时，$x+\mathrm{i}y$ 将作为 $u+\mathrm{i}v$ 的函数而被决定(不一定是单值的)。除了与使 $\frac{\partial A(z)}{\partial z}=0$ 的点 $z=x+\mathrm{i}y$ 相对应的那些点 $u+\mathrm{i}v$ 外，这个函数是解析函数，但是半纯的。边界 $x=0$ 是一曲线，其参数方程为

$$u+\mathrm{i}v=A(\mathrm{i}y)\ (y\ 为实数)\ . \tag{4.17}$$

这个曲线自身可以相交任意多次。但一般说它使平面分为两个区域。让我们从 y 由 $-\infty$ 逐渐跑到 ∞ 的方向来考虑曲线(4.17)的情形。这时，如果我们越出曲线(4.17)，沿着一不再与(4.17)相交的连续曲线向右前进，我们就得到一个点集，不属于这个点集也不在(4.17)上的点，叫做外点，曲线(4.17)中包括外点的极限点的那一部分，叫做有效边界。所有其他的点都叫做内点。例如，在图 1 中，箭头所画的表示边界，阴影区域是内

点，有效边界用粗线表示。

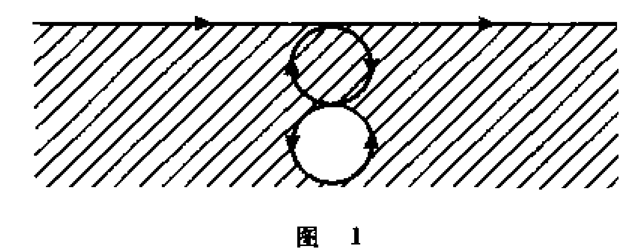


图 1

因此，A 在任意一个右半平面内有界的条件，将是无穷远点，不能为内点。它可以是边界点，但是对于这种边界点的类型必须加以十分严格的限制。这些限制和内点集离无穷远点的"厚度"①有关。

现在，我们来研究线性反馈的数学表示问题。假定系统控制过程的示意图(不是线路图)如图 2：

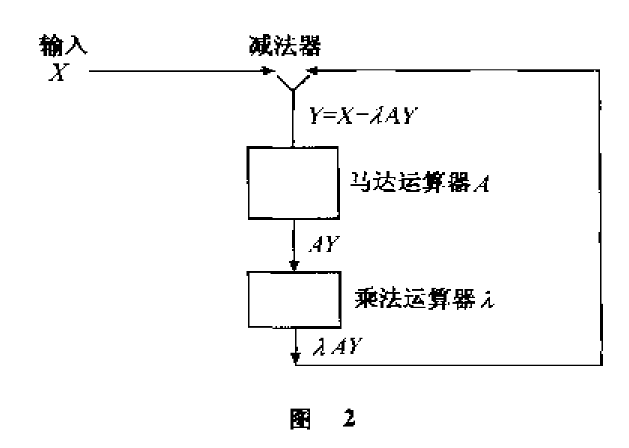


图 2

这里，马达运算器的输入为 Y，它是初始输入 X 与乘法运算器输出之差，乘法器对马达动力输出的倍加因子为 λ。即

$$Y = X - \lambda AY \tag{4.18}$$

或

$$Y = \frac{X}{1+\lambda A}; \tag{4.19}$$

因而马达的输出为

$$AY = X\frac{A}{1+\lambda A}. \tag{4.20}$$

因此，相应于整个反馈机构的运算子为 $A/(1+\lambda A)$。这个运算子当且仅当 $A=-1/\lambda$ 时才等于无穷大。对于这新的运算子，(4.17)为

$$u+\mathrm{i}v = \frac{A(\mathrm{i}y)}{1+\lambda A(\mathrm{i}y)}; \tag{4.21}$$

---

① 厚度——设 ε 为正，令 $z=x+\mathrm{i}y$ 平面中 $x\geqslant\varepsilon$ 的部分的 $A(x+\mathrm{i}y)$ 向 $u+\mathrm{i}v$ 平面的映象(mapping)为 $\mathfrak{U}(\varepsilon)$，则 $A(x+\mathrm{i}y)$ 因 $x\geqslant\varepsilon>0$ 而成为有界的集合，而且如果 $\varepsilon>\varepsilon'$，则 $\mathfrak{U}(\varepsilon')$ 含有 $\mathfrak{U}(\varepsilon)$。内点集合是 $\varepsilon\to0$ 时 $\mathfrak{U}(\varepsilon)$ 的极限集合。称无限远点在一切 $\mathfrak{U}(\varepsilon)$ 之外为"厚度"。——日译者注

当且仅当$-\frac{1}{\lambda}$是(4.17)的内点时，无穷远点才是内点。

如果$-\frac{1}{\lambda}$是内点，一个倍加因子为λ的反馈一定会引起许多麻烦，事实上，这些麻烦就是系统这时要陷于无终止的愈来愈强的振荡。反之，如果$-\frac{1}{\lambda}$是外点，我们可以证明这个困难不会发生，这时反馈是稳定的，如果点$-\frac{1}{\lambda}$在有效边界上，就需要比较复杂的讨论，在大多数场合，系统都会发生振幅并不增大的振荡。

考虑几个运算子A的例子和它们许可的反馈范围，也许是值得做的一件事，我们不仅要考虑(4.02)形式的运算子，而且也要考虑它们的极限，假如以上的论证同样可以适用于它们的话。

如果取运算子A为微分运算子$A(z)=z$，则当y从$-\infty$到∞时，$A(y)$同样从$-i\infty$到$i\infty$，内点是右半平面的内点。$-\frac{1}{\lambda}$永远是外点，所以任意等级的反馈都是可能的。若取运算子为

$$A(z)=\frac{1}{1+kz}, \tag{4.22}$$

则曲线(4.17)为

$$u+iv=\frac{1}{1+kiy}, \tag{4.23}$$

或

$$u=\frac{1}{1+k^2y^2}; v=\frac{-ky}{1+k^2y^2}, \tag{4.24}$$

它可以写成

$$u^2+v^2=u. \tag{4.25}$$

这是一个半径为1/2，中心在(1/2,0)的圆。它的旋转方向是顺时针方向，内点是通常认为内点的那些点。在这情形下，当$-\frac{1}{\lambda}$永远在圆外时，许可的反馈范围也是没有限制的。与这运算子对应的$a(t)$为

$$a(t)=\frac{e^{-t/k}}{k}. \tag{4.26}$$

又，假设

$$A(z)=\left(\frac{1}{1+kz}\right)^2. \tag{4.27}$$

于是(4.17)为

$$u+iv=\left(\frac{1}{1+kiy}\right)^2=\frac{(1-kiy)^2}{(1+k^2y^2)^2}, \tag{4.28}$$

即

$$u=\frac{1-k^2y^2}{(1+k^2y^2)^2}; v=\frac{-2ky}{(1+k^2y^2)^2}. \tag{4.29}$$

我们得到

$$u^2+v^2=\frac{1}{(1+k^2y^2)^2}, \tag{4.30}$$

或

$$y=\frac{-v}{(u^2+v^2)2k}. \tag{4.31}$$

于是

$$\begin{aligned} u&=(u^2+v^2)\left[1-\frac{k^2v^2}{4k^2(u^2+v^2)^2}\right] \\ &=(u^2+v^2)-\frac{v^2}{4(u^2+v^2)}. \end{aligned} \tag{4.32}$$

在极坐标中，$u=\rho\cos\phi, v=\rho\sin\phi$，上式变为

$$\rho\cos\phi=\rho^2-\frac{\sin^2\phi}{4}=\rho^2-\frac{1}{4}+\frac{\cos^2\phi}{4}, \tag{4.33}$$

或

$$\rho-\frac{\cos\phi}{2}=\pm\frac{1}{2}, \tag{4.34}$$

即

$$\rho^{\frac{1}{2}}=-\sin\frac{\phi}{2}\;;\;\rho^{\frac{1}{2}}=\cos\frac{\phi}{2}. \tag{4.35}$$

能够证明，这两个方程仅仅表示一条曲线，它是顶点为原点而歧点在右边的心脏线。这个曲线的内点不包含负实轴上的点；和上面情形一样，许可的放大率也是没有限制的。这时运算子$a(t)$为

$$a(t)=\frac{t}{k^2}\mathrm{e}^{-t/k}. \tag{4.36}$$

假设

$$A(z)=\left(\frac{1}{1+kz}\right)^3. \tag{4.37}$$

并假设ρ和ϕ的定义和上一情形中的一样。于是，

$$\rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\phi}{3}+\mathrm{i}\rho^{\frac{1}{3}}\sin\frac{\phi}{3}=\frac{1}{1+k\mathrm{i}y}. \tag{4.38}$$

和第一个例子中一样，我们可推得

$$\rho^{\frac{2}{3}}\cos^2\frac{\phi}{3}+\rho^{\frac{2}{3}}\sin^2\frac{\phi}{3}=\rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\phi}{3}. \tag{4.39}$$

即

$$\rho^{\frac{1}{3}}=\cos\frac{\phi}{3}, \tag{4.40}$$

它是如下形状的曲线(见图 3)。阴影区域表示内点区域。所有系数超过 8① 的反馈都是不可能的。相应的$a(t)$为

$$a(t)=\frac{t^2}{2k^3}\mathrm{e}^{-t/k}. \tag{4.41}$$

---

① 当$\phi=\pi$时，$\rho=\left(\cos\frac{\pi}{3}\right)^3=\frac{1}{8}$。因此反馈系数$\lambda>8$时，反馈是不可能的。——汉译者注

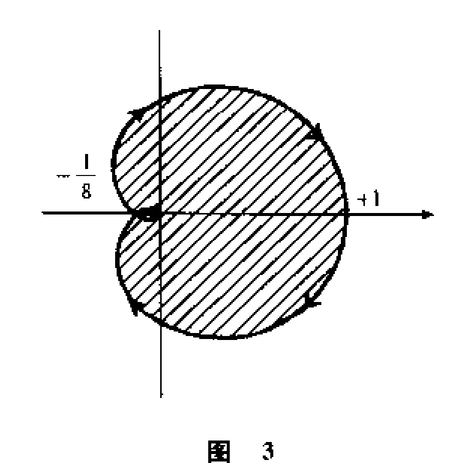


图 3

最后，假设运算子 A 是一个简单的延迟 T 单位时间的运算子。即

$$A(z) = e^{-Tz}. \tag{4.42}$$

我们得到

$$u + iv = e^{-Tiy} = \cos Ty - i\sin Ty. \tag{4.43}$$

曲线(4.17)是以单位速度和顺时针方向绕原点旋转的单位圆。这个曲线的内部是通常意义上的内部，反馈的极限强度为 1。

由此可以作出一个很重要的结论：用任意强度的反馈来补偿运算子 $1/(1+kz)$ 都是可能的，对于任意宽的频带，它都可以使 $A/(1+\lambda A)$ 无限接近于 1。因此，用三次，甚至只用两次的逐次反馈就可以补偿三个这种逐次作用的运算子，但是，我们不可能用单次反馈来无限补偿运算子 $1/(1+kz)^3$，因为这个运算子是三个运算子 $1/(1+kz)$ 级联起来的合成结果。运算子 $1/(1+kz)^3$ 也可以写成

$$\frac{1}{2k^2}\frac{d^2}{dz^2}\frac{1}{1+kz}; \tag{4.44}$$

可以把它看成三个具有一次式分母的运算子的加法合成的极限。因此，它是这样三个不同运算子的和，其中每一个都可以用单次反馈来任意补偿，但它们的和却不能用单次反馈来补偿。

在麦考尔的重要著作中，我们可以看到复杂系统的例子，它能够用两次反馈来稳定，但不能用一次反馈来稳定。使用回转罗盘驾驶船舶时就遇到这种情形。舵手预定的航向和罗盘仪上指示的航向之间的角度，本身表现为舵的转动，这个转动在船前进方向上产生一个转矩以改变船的航向，使得预定航向和实际航向间的差异减少。如果这个过程的完成，是由于直接打开某一舵机的活阀并关上另一舵机的活阀而使舵的转动速度和船的偏航度成比例的话，那么，舵的角位置就大致和船的转矩成比例，也就是和它的角加速度成比例。因此，船转动的大小和偏航度的三次微商的负值成比例，而我们必须依靠回转罗盘的反馈来稳定的操作是 kz^3，这里 k 是正的。这时曲线(4.17)为

$$u + iv = -kiy^3, \tag{4.45}$$

因为左半平面是内点区域，所以用任何伺服机构都不可能稳定这个系统。

在以上的考虑中，我们对驾驶的问题有点过于简单化了。实际上是有一定摩擦力存

在的，船的加速度不仅仅由使船转动的力决定。因此，如果 θ 是船的角位置而 φ 是舵相对于船的角位置，我们有

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = c_1\phi - c_2\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{4.46}$$

和

$$u + \mathrm{i}v = -k_1\mathrm{i}y^3 - k_2y^2. \tag{4.47}$$

这个曲线可以写成

$$v^2 = -k_3u^3, \tag{4.48}$$

它仍然不能用任何反馈来稳定，当 y 从 $-\infty$ 跑到 ∞ 时，u 从 ∞ 跑到 $-\infty$，曲线的左侧是内部。

但是，如果舵的位置和偏航度成比例，那么用反馈来稳定的运算子为 $k_1z^2 + k_2z$，而(4.17)变为

$$u + \mathrm{i}v = -k_1y^2 + k_2\mathrm{i}y. \tag{4.49}$$

这个曲线可以写成

$$v^2 = -k_3u, \tag{4.50}$$

但在这场合下，当 y 从 $-\infty$ 跑到 ∞ 时，v 也从 $-\infty$ 跑到 ∞，曲线的图形是从 $y=-\infty$ 到 $y=\infty$ 来描画的。这时曲线的左侧是外部，因此无限大的放大率都是可能的。

为了达到这个目的，我们可以使用更高级的反馈。如果我们不是用实际航向与预定航向间的偏离，而是用这个量与舵角位置间的差别来调节舵机活阀位置的话，舵的角位置就非常精确地和船的偏航度成比例，不过需要足够强度的反馈——即需要将活阀打开得足够宽。这种双重的反馈控制系统，事实上就是我们用回转罗盘自动驾驶船舶时通常采用的。

在人的躯体中，手的运动或手指的运动都是一个包括很多关节的系统的运动。整个输出是所有这些关节的输出的矢量和。我们前面看到，一般说，像这种复杂的加法系统不能用单次的反馈来稳定。因此，通过对于表示运动尚未完成的量的观察来调节一个动作的随意反馈，还需要其他形式的反馈来帮助。我们把这些反馈叫做姿势反馈(postural feedback)，它们和肌肉系统紧张力的一般维持有关，随意反馈在小脑受伤的场合具有衰退或紊乱的倾向，这时如果病人不企图完成一个随意动作，就不会出现震颤，如果病人不能够做到端起一杯水而不倾覆它，这是目的震颤，它的性质和帕金森震颤(tremor of Parkinsonianism)或震颤麻痹有本质的不同。最典型的帕金森震颤往往出现在病人休息的时候，而当他试图完成一个特定动作时，看起来却常常是很镇静的。有一些患有帕金森症候的出现不是根源于小脑疾病，而是由于脑干中的某些部位有了病理上的病变，这仅仅是一种姿势反馈疾病的原因，还有许多姿势反馈疾病则是根源于神经系统其他部位的病变。生理控制学的重大任务之一，就是要分解出随意反馈和姿势反馈的复合体的各个不同的部分。搔反射和步行反射就是这种组分反射(component reflex)的例子。

当反馈可能而且稳定的时候，如我们已经提到的，它的优点是使运转不受负载的影响。假设负载使特性 A 改变 $\mathrm{d}A$，则改变率为 $\mathrm{d}A/A$。如果反馈后的运算子为

$$B = \frac{A}{C + A} \tag{4.51}$$

我们就有

$$\frac{\mathrm{d}B}{B}=\frac{-\mathrm{d}\left(1+\frac{C}{A}\right)}{1+\frac{C}{A}}=\frac{\frac{C}{A^2}\mathrm{d}A}{1+\frac{C}{A}}=\frac{\mathrm{d}A}{A}\frac{C}{A+C}. \tag{4.52}$$

因此，反馈使得系统与马达特性的依赖关系减少，而且使系统稳定，因为对所有的频率我们都有

$$\left|\frac{A+C}{C}\right|>1. \tag{4.53}$$

这就是说，内点和外点间的全部边界都必须处在圆心为 $-C$，半径为 C 的圆以内。然而，这即使在我们前面讨论过的第一个例子中也不是如此。如果一个强负反馈一直是稳定，他的作用就在于能使系统的低频稳定度增加，但是一般要以牺牲系统的一定高频稳定度为代价。在许多场合下，即使是这种有代价的稳定程度也是好的。

由于过量反馈引起振荡而发生的一个很重要的问题，就是初期振荡的频率问题。这个频率由 $\mathrm{i}y$ 中的 y 值决定，$\mathrm{i}y$ 对应于处在负 u 轴最左端的(4.17)的内区域和外区域的边界上的点，量 y 当然是一个具有频率性质的量。

我们现在要结束从反馈的观点来研究线性振荡的基本讨论了。线性振荡系统具有若干很特殊的性质，使得它的振荡具有若干特征。其中一个特征是，当系统在振荡时，它总能够(如果没有其他同时的独立振荡)而且一般说一定是按下一形式振荡：

$$A\sin(Bt+C)\mathrm{e}^{Dt}. \tag{4.54}$$

周期性非正弦振荡的存在，常常表明至少对于我们所观察的变量来说系统是非线性系统的。在某些场合，选择新的独立变量后可以使系统再成为线性的，不过这种场合很少。

线性振荡和非线性振荡另一个很重要的区别是：对于前者，振荡的振幅与频率完全无关；而对于后者，对应于给定的振荡频率，系统的振荡一般只有一个振幅，或者至多只有一组离散的振幅，同时系统也只能有一组离散的振荡频率。我们考察一下风琴管的情形就可以很好地说明这一点，风琴管的理论有两种：比较粗糙的线性理论和比较精确的非线性理论。第一种理论把风琴管当做一个保守系统来处理，不考虑风琴管是如何发生振荡的，并且认为振荡的振幅完全不确定。第二种理论把风琴管的振荡看成能量逸散的过程，并认为这能量来自通过管口的空气流。理论上，的确存在通过管口的稳定状态的空气流，它不和风琴管的任何其他形式的振荡交换能量；但是，对于空气流的某些速度，这个稳定状态的条件是不稳定的。这时，只要偶尔稍为离开这个条件，就会引起能量从空气流输入到风琴管的某一种或多种本征线性振荡中；当能量输入到达一定程度时，就将使管的固有振荡与能量输入的耦合加强。单位时间的能量输入和由于热逸散产生的能量输出，虽然具有不同的增长规律，但达到振荡和稳定状态时，这两个量必须相同。因此，非线性振荡的振幅和它的频率一样，也就这样被确定了。

我们上面考查的情形，是一种叫做张弛振荡的例子。在张弛振荡的场合，系统的方程组对时间原点的推移不变，它的解对时间是周期性的(或是对于推广了的周期性概念而言是周期性的)，它的振幅和频率是一定的，但周相则不固定。在我们讨论过的情形中，系统的振荡频率接近于系统的某一疏耦合的，近似于线性的部分的频率。

梵·德·波尔(B. Van der Pol)是研究张弛振荡的主要权威之一，他曾经指出，上述情形并不经常发生，事实上有些张弛振荡的主频率并不接近于系统的任何线性振荡部分的频率。举一个例子：一股煤气流进一通空气的室，在室中燃一指示灯；当空气中煤气浓度到达某一临界值时，在指示灯点火下，这个系统就要爆炸，发生爆炸的时间仅决定于煤气的流率、空气渗进和燃烧产物渗出的速率，以及煤气和空气这爆炸混合物的成分百分比。

一般说，非线性方程组很难求解。但是有一种特别容易处理的情形，在这情形下，系统和线性系统只有很小的差别，方程组中非线性的项改变得很慢。以致在一个振荡周期中事实上可以看成是常数。这时，我们可以把这非线性系统当做具有缓变变化参量的线性系统来处理。能够用这种方法研究的系统叫做久期微扰系统，它的理论在引力天文学中起着很重要的作用。

把生理上的若干震颤大致当做若干久期微扰系统来处理，是十分可能的。在这样的系统中，我们可以很清楚地看到，为什么稳定状态的振幅和频率一样也是确定的。假设这系统的某一个要素是一放大器，并假设当系统的输入在一长时间内的平均值在增加时，放大器的增益减少。于是，当系统建立起振荡时，放大器的增益会一直减削到系统到达平衡状态为止。

关于非线性张弛振荡系统，有些场合已经用希耳(Hill)和邦加来的方法研究过了。[1]研究张弛振荡的经典场合。是系统的方程为微分方程的场合，特别是低阶微分方程的场合。当系统未来的行为依赖于它的全部过去的行为时，这是积分方程的场合；据我所知，目前对这种情形还没有什么足够的研究。但是，我们不难大体说一下它的理论所应当采取的形式。特别是当我们只注意周期解的时候。这时，方程中各个常数的微小变化会使运动方程发生微小的、因而接近线性的变化。例如，令 $Op\{f(t)\}$ 是 t 的一个函数，它是对 $f(t)$ 进行非线性运算后产生的，它受平移的影响。于是，和 $f(t)$ 的变分 $\delta f(t)$ 对应的 $Op\{f(t)\}$ 的变分为 $\delta Op\{f(t)\}$，这时系统发生的动力学上的变化对 $\delta f(t)$ 说是线性的但不是齐次的，虽然对 $f(t)$ 说是非线性的。如果我们已知

$$Op[f(t)] = 0 \tag{4.55}$$

的一个解 $f(t)$，并改变这力学系统的性质，我们就得到 $\delta f(t)$ 的一个非齐次线性方程。如果

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{i\lambda nt}, \tag{4.56}$$

而且 $f(t)+\delta f(t)$ 也具有周期性形式：

$$f(t) + \delta f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} (a_n + \delta a_n) e^{in(\lambda+\delta\lambda)t}; \tag{4.57}$$

则

$$\delta f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta a_n e^{i\lambda nt} + \sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{i\lambda nt} in\delta\lambda t\ . \tag{4.58}$$

$\delta f(t)$ 的线性方程中的所有系数都能展成 $e^{i\lambda nt}$ 的级数，因为 $f(t)$ 本身能够展成 $e^{i\lambda nt}$ 的级数。因此，我们得到一个包括无限个方程的 $\delta a_n + a_n$，$\delta\lambda$ 和 λ 的非齐次线性方程组，它可以用

[1] Poincaré, H.. "Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste".

希耳的方法来求解。在这时，至少可以设想从一个线性方程（非齐次的）出发应用逐步求近法，来求得非线性张弛振荡问题的一个很普遍的解。然而，这个工作还有待于将来。

在一定意义上说，这一章讨论的反馈控制系统和上一章讨论的补偿系统性质上是相媲美的。它们都能使一个效应器的复杂输入-输出关系变为简单的比例关系。如我们前面看到的，反馈系统的作用还不止此，它的运转相对地说不依赖于效应器的特性和特性的变化。因此，这两种控制方法的相对有用性，取决于效应器的不变性。我们自然认为最有利的场合是把这两种方法组合起来使用。组合的办法有很多种，图 4 说明一种最简单的组合办法：

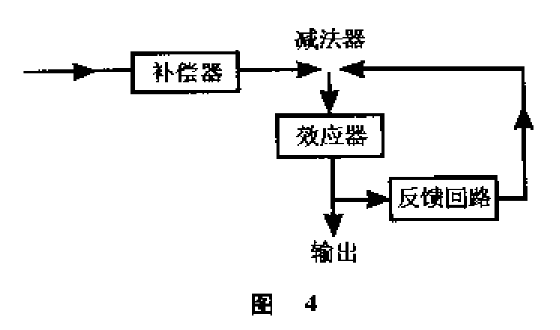


图 4

在图 4 中，可以把整个反馈系统看成一个更大的效应器，这样，除了必须把补偿器安装得能够补偿在一定意义上表示反馈系统的平均特性的那个量以外，这个图就没有什么新颖的地方了。另一种类型的组合装置如图 5。

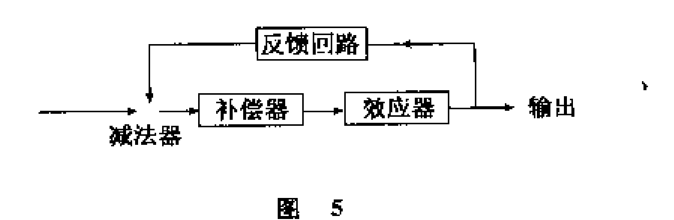


图 5

这里，补偿器和效应器组合成一个更大的效应器。这样安排一般会改变最大许可反馈量，从这样的安排中，我们不容易看出为什么它往往能使反馈量有相当程度的增加。此外，在同样大小的反馈量下，这种装置显然能改善系统的运转。例如，如果效应器具有延迟的特性，则补偿器就要是一个预报器或预测器，这个预测器是针对输入的统计系综而设计的。这样的反馈可以叫做预报反馈，它起着催促效应器机构动作的作用。

这种普遍形式的反馈一定能在人类和动物的反射中发现。当我们射猎野鸭时，我们希望减到最低程度的误差不是枪的位置和目标的实际位置间的误差，而是枪的位置和目标的预期位置间的误差。任何防空炮火控制系统都一定遇到同样的问题。关于预报反馈的稳定性条件和有效性条件，目前还需要作更透彻的讨论。

当一辆卡车驾驶在结冰的道路上时，我们会看到另外一种有趣的反馈形式。我们的整个驾驶操作依赖于对路面滑溜情况的知识，即依赖于对车-路系统运转特征的知识。如果我们想依靠这系统的普通运转获得这个知识的话，那么，我们在得到这个知识以前可能就滑出去了。因此，我们必须不断给驾驶盘以小而迅速的力，这些力不会使卡车更严重地滑出去，却完全足够向我们的运动神经报告这卡车是否有滑翻的危险，我们就根

据这些消息来调节驾驶操作。

这种控制方法可以叫做信息反馈控制，我们不难把它图解成机械的形式，在实际中使用它是完全值得的。在这个机械形式中，包括一个用来补偿效应器的补偿器，它的特性可以由外界加以改变。我们在传入的消息上，加上一个弱的高频输入；并从效应器输出中取出同样高频的那一部分输出，用一个适当的滤波器使它与输出的其他部分分离开来，为了知道效应器的运转特性，我们必须考察高频输出对输入的振幅-周相关系。根据这个关系，就可以适当地改善补偿的特性。这种系统的示意图很多，如图 6 所示。

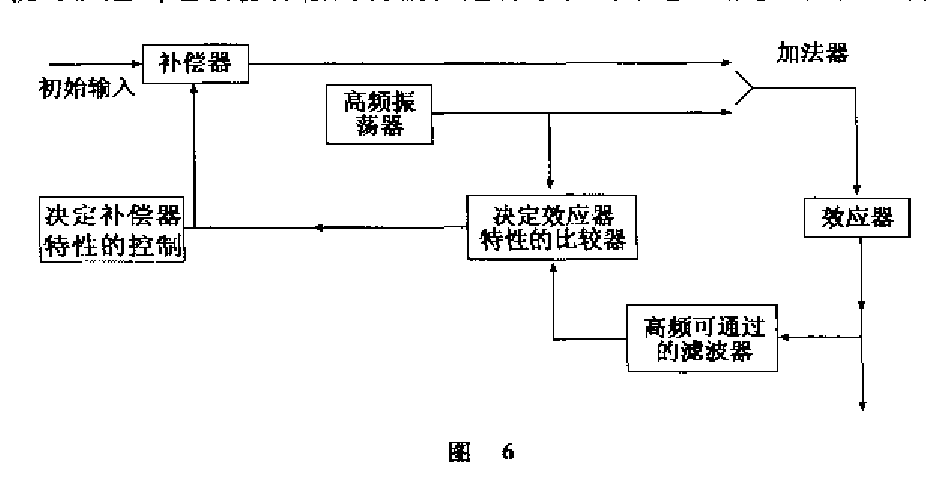


图 6

这种形式的反馈的优点，是可以校准补偿器，使得它对任何种类的不变负载都是稳定的；而且，如果负载特性的改变比起初始输入的变化来足够慢（这种改变的方式我们前面叫做久期式的），如果负载条件的读数准确，那么系统就不会产生振荡。有很多场合，负载就是按照这种久期的方式改变的。例如，炮塔上炮的摩擦负载依赖于所擦油的硬度，而这又依赖于温度；但在炮塔转动不多时这个硬度是没有显著变化的。

当然，只有在高频负载特性与低频的相同或者能适当地由后者来表示时，信息反馈才能工作得很顺利。这种场合往往在负载特性（因而效应器的特性）涉及的可变参数数目相对少时发生。

信息反馈和上面列举的带补偿器的反馈的例子，仅仅是一种很复杂理论的特殊情况，这个理论还没有研究得很完整。整个理论正在迅速发展中。在最近的将来我们必须予以更多的注意。

在结束这一章以前，我们不要忘记反馈的原理在生理学上还有一个重要的应用。在很多场合，一定形式的反馈不仅是生理现象中常见的例子，而且它对生命的延续也是绝对必要的，我们在所谓稳态（homeostasis）的情形中可以看到这点。高级动物的生命，特别是健康的生命，能够延续下去的条件是很严格的，体温只要有摄氏半度的变化，一般就是疾病的征候；如果有长时间的 5 度变化，就不能保持生命。血液的渗透压和它的氢离子浓度必须保持在严格限度内。体内的废物在浓度达到有毒以前必须排泄出去。此外，白血球和抵抗感染的化学防疫作用必须保持适当的水平；心搏率和血压必须既不太高也不太低；性生殖周期必须符合种族的生殖需要；钙代谢必须既不使我们的骨质松化，也不使我们的组织钙化，等等。一句话，我们内部组织中必须是一个由恒温器、氢离子浓度自动控制器、调速器等等构成的系统，它相当于一个巨大的化学

工厂。我们把这些总起来叫做稳态机构。

稳态反馈与随意反馈和姿势反馈有一个很大的差别，稳态反馈进行得比较迟缓。因为几分之一秒内发生的生理上的稳态的改变，就使身体遭受严重而经久的创伤，这样的情况是少见的，即使对于大脑贫血来说，也不会发生这种情况。因此，进行稳态的神经纤维（交感神经系和副交感神经系）往往是无髓鞘的，我们知道，它们比有髓鞘纤维的传导速度迟缓得多。典型的稳态效应器（平滑肌和分泌腺）的动作比起随意活动和姿势活动的效应器（横纹肌）的动作来也是迟缓的。有许多有关稳态系统的消息是通过非神经通道传导的，这些非神经通道就是心脏肌纤维的直接吻合，或化学媒介，例如荷尔蒙、血液中的碳酸气等等；除了通过心脏肌纤维传导的场合，它们一般也比有髓鞘纤维的传递方式迟缓。

任何一本关于控制学的教程，都应当透彻详尽地讨论稳态的过程，有关这个过程的许多个别情形已经在文献中相当详尽地讨论过了。[①] 但是，对本书说，与其说对这个问题已作了一个概要的论述，不如说只是作了一个引导。上述稳态过程的理论需要比较详尽的一般生理学知识。

---

① Cannon, W., The Wisdom of the Body, W. W. Norton & Company, Inc., New York, 1932; Henderson, L. J., The Fitness of the Environment, The Macmillan Company, New York, 1913.

第五章

计算机和神经系统

· V Computing Machines and the Nervous System ·



维纳在清华工作虽然仅一年，但却给人留下了难忘的印象。他中等个子，胖胖的体形，有时穿一双中国式的布鞋，脸颊上长满了犹太民族的大胡须，高高的鼻梁上戴着一副高度近视的眼镜，他才华出众，却平易近人。他热衷于科学研究工作，经常废寝忘食。据说，有一次他从寓所出来去食堂吃饭，在路上碰到朋友，便和朋友讨论起学术问题。过后，他却忘记自己是否已经吃过饭，便问朋友：你刚才看见我是朝食堂方向走，还是朝寓所走的？朋友开玩笑地说，看你是朝寓所方向走的。于是，他便连声说："对！对！我已经吃过饭了"，便走回寓所，继续他的研究工作。在日常生活中，他还有许多生动有趣的轶事。难怪有人风趣地说，他是"来自宇宙的公民"，对地球上的人间生活比较生疏，称他是一个大智若愚的古怪天才。


MASSACHVSETTS INSTITVTE OF TECHNOLOGY

计算机本质上是一种记录数字、运算数字并给出数字结果的机器。它的成本中的很大一部分，无论就经济方面说或就建造的劳力方面说，都花费在数字要记录得清楚而准确这个简单问题上。最简单的记录数字的方式似乎是利用均匀刻度尺，上面附有一个能够移动的游标。如果我们希望记录一个数字准确到 n 分之一，那么必须保证在尺上任何一个区域中游标所指的位置都具有这个准确度。这就是说，当信息量为 $\log_2 n$ 时，我们无论怎样移动游标都必须要满足这个准确度的要求，这时记录的耗费可以写成 An 的形式，这里 A 约为常数。更确切地说，由于 $n-1$ 个区域中满足了准确度的要求，剩下的那个区域也一定满足准确度的要求，所以记录信息量 I 的耗费大致为

$$(2^I - 1)A . \tag{5.01}$$

如果让这个信息分布在两个尺上，而每个尺的刻度的准确度要小一些，这时，记录这信息量的耗费大致为

$$2(2^{\frac{I}{2}} - 1)A . \tag{5.02}$$

如果让这个信息由 N 个尺来记录，记录的耗费近似地为

$$N(2^{\frac{I}{N}} - 1)A . \tag{5.03}$$

这个量当

$$2^{\frac{I}{N}} - 1 = \frac{I}{N} 2^{\frac{I}{N}} \log 2 \tag{5.04}$$

时具有最小值，或者令

$$\frac{I}{N} \log 2 = x , \tag{5.05}$$

当

$$x = \frac{e^x - 1}{e^x} = 1 - e^{-x}. \tag{5.06}$$

这个等式当且仅当 $x=0$ 或 $N=\infty$时才能成立。这就是说，为了使储存信息的耗费最低，N 应当尽可能的大。我们知道，$2^{I/N}$必须是一不等于 1 的整数，因为当 $2^{I/N}=1$ 时，这意味着要用无限个尺，而每一个尺却不包含一点信息。$2^{I/N}$最有意义的数值是 2，这时，我们的数字记录在一组彼此不相关的尺上，而每个尺又分为两个相等部分。换句话说，我们在一组尺上用二进位制来表示数，在二进位制的尺上，我们只需知道一个固定量落在尺的两个相等部分的这一边或另一边，而且，所观察的量不能肯定落在尺的哪一半，这种可能性小得简直可以忽略。这就是说，数 ν 可以表示成下列形式：

$$\nu = \nu_0 + \frac{1}{2}\nu_1 + \frac{1}{2^2}\nu_2 + \cdots + \frac{1}{2^n}\nu_n + \cdots , \tag{5.07}$$

式中的每个 ν_n 或者为 1，或者为 0。

现代的计算机可以分为两大类型，像布什(Bush)微分分析器那样的，[①]叫做**模拟计**

① Journal of the Franklin Institute 所载 1930 年以后的各论文。

◀麻省理工学院主楼

算机，在这种机器中，数据用某种连续尺上的量度来表示，因而其准确度取决于尺的构造的准确程度；像通常台式加法或乘法机那样的，叫做数字计算机，在这种机器中，数据用一套可能事件的一组选择来表示，而其准确度取决于这些可能事件能够加以区别的明晰程度，取决于每次选择时可供挑选的可能事件的数目和给定的选择次数。因此，对于要求高度准确的计算说，用数字计算机总是比较合适的，尤其是根据二进位制制造的数字计算机，因为在这种数字计算机中每次选择时可供挑选的可能事件为 2。我们之所以采用十进位制的计算机完全是由历史的偶然所决定的，根据十个手指建立起来的计数尺度，早在印度人发现零的重要性和坐标记数的优点时，就已采用了。当大部分计算需要依靠以常用的十进位制形式把数字送入机器，而取出的数字必须用同样形式表示的那种计算机来完成时，十进位制的计算机还是值得保留的。

其实这就是通常的台式计算机的使用，例如在银行中，企业机关中和许多统计研究部门中所使用时。但是，对于更大型的和更自动化的用起来最方便的计算机说，采用十进位制并不是最好的方向。一般说，任何一种计算机之所以被使用，是由于用它比用手更快。在任何形式联合起来使用的计算手段中，就像任何联合的化学反应一样，整个系统的时间常数的数量级由最缓慢的一种决定。因此，在任何复杂的计算过程中要尽可能消除人的因素，只是在最初和最终的运算阶段，在这些绝不可免的地方才用到人，做到这点是很有好处的。在这时，应当有一个改变记数制度的工具，以便在计算过程的最初和最后阶段应用；而所有中间的运算过程则用二进位制来完成。

因此，理想的计算机必须在运算一开始就放入所有的数据，以后必须尽可能没有人的干预直到运算终了。这就是说，我们不仅必须在运算开始时把数据放入机器，而且在计算过程中，组合这些数据的全部规则也必须以指令的形式放入机器，这些指令应估计到计算过程中可能发生的各种情况。因此，计算机既要是一个算术机器，又要是一个逻辑机器，它必须根据系统的算法把可能发生的事件组合起来。用来组合可能事件的算法可以有许多种，在已知最好的算法中最简单的一种叫做逻辑代数，或者叫做布尔（Boole）代数。这种算法和二进位制算术一样，都是以二分法为基础的，即以是或否的选择，在类中或不在类中的选择为基础的。这种体系比其他体系更为优越的原因，和二进位制算术比其他算术更为优越的原因相同。

所有放入机器的数据，无论是数字的或是逻辑的，都用两个二中择一事件的一系列选择来表示；数据的全部运算也采取由一系列旧的选择决定一系列新的选择的形式。当我们把两个一位数字 A 和 B 加起来时，就得到一个二位数字，如果 A 和 B 都是 1，头一位数字就是 1，否则是 0；如果 $A \neq B$，第二位数字是 1，否则就是 0。多位数字的相加遵从类似的法则，但比较复杂。二进位制的乘法和十进位制的一样，可以简化为乘法表和数字的加法；二进位乘法的法则有着特别简单的形式，如下表所示：

×	0	1
0	0	0
1	0	1

(5.08)

因此，二进位乘法不过就是由给定的一组旧数字决定一组新数字的方法。

在逻辑方面，如果 O 是一个否定的判断，I 是一个肯定的判断，那么每个运算子都可

以由以下三种运算结构：否定，它使 I 变为 O，O 变为 I；逻辑加法，如下表：

$$\begin{array}{c|cc} \oplus & O & I \\ \hline O & O & I; \\ I & I & I \end{array} \tag{5.09}$$

和逻辑乘法，它的乘法表和(5.08)的(1,0)制数字乘法表相同，即

$$\begin{array}{c|cc} \odot & O & I \\ \hline O & O & O; \\ I & O & I \end{array} \tag{5.10}$$

这就是说，计算机在进行运算时，不过就是根据事先决定的一套固定规则从 I 和 O 这两个数字中进行一系列新的选择。换句话说，计算机是由一组结构相同的替续器构造起来的，每个替续器只能处在两个状态中的一个，即“通”或“不通”；对于每一运算步骤，各个替续器的状态由前一运算步骤中若干个或全部替续器的状态来决定。可以由某个中央同步装置或若干中央同步装置来准确地“确定”这些运算步骤的动作时间；也可以设法使每个替续器的状态保持不变，直到所有应在运算过程中动作得较早的替续器完成了全部规定步骤后，它们才动作。

计算机中使用的替续器可以是各种各样性质的。它们可以是纯机械性的；也可以是电-机械性的，例如电磁替续器，这种替续器的电枢可以一直保持两个可能平衡状态中的一个，直到某个适应的脉冲输入使它建立起另一状态为止。它们也可以是具有两个相反的平衡状态的纯电学系统，这种系统可以用气体充电管构成，也可以用动作迅速得多的高真空管构成。替续系统的两个可能状态在没有外界干扰时可以都是稳定的，或者只有一个状态稳定而另一状态是过渡性的，在第二个场合下，一定要(在第一个场合一般也要)有一种特殊的装置，把准备在将来动作的脉冲保存起来，并避免计算机因某个替续器自发地、无限地重复同一动作时所发生的障碍。以后我们还要比较详细地来讨论这个关于记忆的问题。

我们知道，能够做计算系统所做工作的人和动物的神经系统，它们的元件动作起来就像理想的替续器，这个事实值得我们注意。这些元件就是所谓的神经元或神经细胞。它们在电流影响下虽然显示一些比较复杂的性质，但它们通常的生理活动极其符合“全或无”原理，就是说，它们或者处在休止状态；或者在“激发”(“fire”)时历经一系列与刺激性质和强度几乎无关的兴奋。首先，一个兴奋从神经元的一端以确定速度传递到另一端，接着就是不应期(refractory period)，在不应期中，神经元或者不能再被刺激，或者至少不被任何正常生理过程所刺激。在这个有效不应期终止以后，神经元仍然保持休止状态，但可以再被刺激而动作起来。

因此，实质上可以把神经看做一个只具有两个动作状态的替续器——激发和休止。除了从游离末梢(free endings)或感觉末梢器(sensory end-organs)获得消息的那些神经元，每个神经元得到的消息都是由其他神经元从它们的接触点处输入的，这些接触点叫做突触(synapse)。一根传出神经元的突触数目可有几个到几百个。在各个突触上，传入冲动的状态与传出神经元自身先前的状态组合起来决定传出神经元是否要激发。如果它既未激发也非不应，而且在某一很短的融合时间内如果“激发”的传入突触数超过了一

定的阈值，那么经过已知的确定不变的突触延迟时间后，这个神经元就会激发。

也许这个图景过于简单了，可能“阈值”不是简单由突触数决定，而是由它们的“权重”(weight)和它们彼此之间的几何关系(相对于从这些突触得到冲动的神经元而言)所决定的；目前我们已有十分令人信服的证据说明，神经系统中有一种不同性质的突触，即所谓“抑制性突触”；这些突触的作用是：或者完全阻止传出神经元激发，或者至少是提高传出神经元对于平常突触刺激的阈值。然而，我们已经十分清楚，和一定神经元具有突触联结的各传入神经元上的各个冲动，只有按照某种确定的组合才能引起那个神经元激发，而其他结合则不能引起它激发。这不是说不可以有其他非神经元性的影响，也许还有一种液递性的影响，这种影响能够使足以引起激发的传入冲动组合方式发生缓慢的、经久性的变化。

神经系统的一个很重要的功能就是记忆，如前所述，计算机也同样要求具有这个功能，它是保存过去运算结果以待将来使用的一种能力。我们下面将看到，记忆有各种各样的用途，任何简单的机构都不可能完全满足这多种用途对它提出的要求。首先，记忆对实现一个流动的过程是完全必要的，例如对乘法，在乘法中，当运算一旦完成后，所有的中间结果就没有价值了，这时运算的装置应当空出来作其他的用途。这样的记忆应当记录得快，读得快，也要清除得快。此外还有一种记忆，是计算机或大脑中相当于档案的记忆部分，叫经久性的记录；它是计算机未来全部行为的根据，至少是机器在一次运转中全部行为的根据。顺便提一下，我们运用大脑和运用计算机的方法有一个重要的区别：机器先后所要作的各个运算程序之间没有什么关系，或者只有最小限度的关系，其中每个程序运算后都能清除掉，但是，大脑在自然过程中，即使基本上清除它过去的记录也是不可能的。因此，大脑在正常情况下并不和计算机完全类似，但和正在完成一次运算程序中的计算机比较，倒颇为类似。我们以后将看到，这一点在精神病理学和精神病学中有其深刻的意义。

现在回到记忆的问题。建立短时间记忆的一个十分令人满意的方法，是使一序列冲动沿着一个封闭线路进行，一直到这环路被外来干扰所清除为止。我们有许多理由相信，大脑在所谓表面上的现在[①](specious present)的那些冲动时，就是这种情形。这种方式已经在若干装置中模仿了，并已采用到计算机中，或者至少有人提议这样做。这种存储装置要求满足两个条件：冲动的传递应当在一种容易产生长时间滞后的介质[②]中进行；在装置发生的差错还没有使冲动过分模糊以前，它就应当尽可能明晰地重新建立起来。第一个条件使我们不能利用光传递来产生延迟，甚至在许多场合也不能利用电路产生延迟，但利用这种或那种弹性振动来产生延迟则是有利的；实际上，计算机就是利用弹性振动来产生延迟的。如果用电路产生延迟，每个阶段产生的延迟就比较短；否则，如同一切线性装置中的情形那样，消息的变形是暴进的，很快消息就变得面目全非了。为了避免

---

① 表面上的现在 — 也叫心理学的现在，严格地说，即是过去的事情，在内心中也觉得是现在的事情的那种心理内容。即，这种心理现象可以看做是具有表面上的现在型的记忆。 —日译者注

② 这大概是依据脑皮的刺激所引起的神经元线路的循环兴奋的东西。与美国巴特莱・比肖普(Bishop)等所谓的循环线路说(theory of reverberating circuits)有关系。请参看下面论文的暂时扫描说(temporal scanning)：Pitts, W. and McCulloch, W. S., Bull. of Math. Biophysics, 9, 127(1947)。— 日译者注

这点，必须作上述第二个考虑：我们必须在线路的某个地方装入一个替续器，它不是用来重复传入消息的波形，而是用来引发预定波形的新消息。这在神经系统中很容易做到，神经系统中所有的传递或多或少都是扳机现象（trigger phenomenon）的传递。在电器工业中，我们早已知道有了这种用途的装置，它用在电报线路中。这套装置叫做电报型中继器，运用这套装置来作经久性记忆的最大困难，就是它们必须在经受一个接一个的、大量的运算周转时不发生一次事故。目前，这方面已经得到了惊人的成就：在曼彻斯特大学威廉先生设计的一套机器中，这种装置的单位延迟时间约为百分之一秒，它能成功地连续运算数小时之久。更惊人的是，这个装置不仅仅能保存一个判断，一个“是”或“否”，而是能保存成千个判断。

和其他形式的记忆大量判断的装置一样，这个装置是根据扫描原理来工作的。在比较短的时间内储存消息的一个最简单的方式，就是电荷储存在电容器中的那种方式；如果还配合上电报型中继器，这就成为一个很合适的储存方式。为了最有效地利用这种储存系统的线路设备，我们希望电容器能逐个地很迅速地转接到另一个电容器。通常是利用机械惯性来达到这个目的，但这不能有超高速性。一个好得多的方法是使用大量的电容器，其中一个电极可以是一小块金属喷到一块电介质上，也可以是电介质本身的非完全绝缘表面，作为这些电容器的一个接线器（connector）的是一束阴极射线，这束射线在扫回线路的电容器和磁石的作用之下，按照一种类似田里犁地的过程那样移动。目前已经有各种不同的精巧装置来实现这个方法，实际上，在威廉先生使用这方法以前，美国无线电公司就已经以另一不同的方式来使用它了。

上面提到的这些储存方法，即使不能把消息保持到像人的生命的时间那样长，也能保持相当长的时间。如果要求更经久的记录，则有广泛的方法可供挑选。除了使用穿孔卡片和穿孔带这类笨而慢的不能清除的方法外，还可以使用磁带，已有能大大消除消息的磁带上的散开的最新改进品；此外，还有使用磷光物质的方法，尤其是使用照相方法。当然，照相法是作经久性的详尽记录的理想方法，从记录一次观察需要的曝光时间应当短这个观点看，它也是理想的方法。但是，它还有两个严重的缺点：显像时间虽然已经短到只有几秒钟，可是如果要使照相法对短时间记忆也能有效，它还是不够短的；其次，目前的事实是，照相记录不容易迅速清除掉并迅速记入新记录。依斯特曼（Eastman）公司的人员正在研究这些问题，看来不是一定不能解决的，可能这时候他们已经找到答案了。

我们上面考虑的许多储存信息的方法，共同具有一个重要的物理要素。这就是，它们似乎都是高度量子简并性的系统；换句话说，都是振动方式很多但频率相同的系统，铁磁性物质的情况就是这样，具有很高介电常数的物质的情况也是这样，因此这些物质特别适合用来作储存信息的电容器。磷光现象同样是高度量子简并性的，照相过程中也显示同样性质的效应，显像用的许多物质似乎都是具有大量内部共振的物质，量子简并性的出现，是由于这种物质具有某种由很小的原因就能产生显著而稳定的结果的能力。我们在第二章中看到，新陈代谢和生殖作用的许多问题与高度量子简并性物质有关。下述的事实也许并不偶然：在无生命环境中，我们发现高度量子简并性的物质具有生命体的第三基本性质，这就是，它的接收冲动和组织冲动，并使这些冲动对外界产生效应的能力。

我们在照相和其他类似过程中看到，可以用若干储存元件发生经久性的改变的方式，来储存消息。当反过来要把这个储存信息重新注入系统时，必须使这些改变去影响正在通过系统的消息。有一个最简单的方法可以做到这点，这就是我们以系统中在正常情况下参与消息传递的、能够改变状态的部分作为储存元件，而且这些元件必须具有这样的性质，即因储存了信息而引起的元件特性的改变能够影响整个未来传递消息的方式。在神经系统中，神经元和突触就是这种储存元件，信息所以能长期储存在大脑中，很可能是由于神经元阈值的改变，或者采取另一个实质相同的说法，是由于每个突触对消息的透过率有改变。现在对这个现象还没有更好的解释，许多人认为，实际上信息是能按照这种方法储存在大脑中的。可以设想，这样来储存信息所以可能，或者是由于新的传导路径被打通，或者是由于旧的传导路径被封锁，人在出生以后，大脑中就再不生成什么新的神经元，这显然已是充分确立的事实。可能也没有什么新的突触形成，虽然这一点还不能完全确定；而记忆过程中阈值的改变主要是在增加，这也是合理的推测。如果一切果真如此，我们的全部生命就是按照巴尔扎克的《驴皮记》(*Peau de Chagrin*)里描写的那种方式进行的：在生命自身浪费掉我们生命力的积蓄以前，学习和记忆过程本身就耗尽了我们的学习能力和记忆力。很可能这个现象的确存在。这是衰老的一种可能解释。然而，衰老的实际现象是非常复杂的，仅仅用这种说法不足以解释。

我们已经说过，计算机，乃至大脑，是一个逻辑机器。这种自然的和人造的机器对逻辑学有什么启发，考虑这个问题不是一件轻而易举的事。这方面的工作主要是由图灵(Turing)进行的[①]，我们说过，推理机器(machine ratiocinatrix)无非就是用机器来进行的莱布尼兹的推理演算器(calculus ratiocinator)；现代的数理逻辑也正是从这种推理演算出发的，因而目前计算技术的发展必然对逻辑学问题有新的启示，今天的科学是操作的科学[②]，这就是说，今天的科学认为每一种陈述本质上都联系到一些可能的实验或可观测的过程。根据这个观点，逻辑问题的研究，必然归结为对逻辑机器(神经的或机械的)的研究和对于这些逻辑机器的所有不可消除的局限和不完整性的研究。

有些读者也许要说，这是把逻辑学归结为心理学，而这两门科学显而易见不同，并且可以证明是不同的。许多思维的心理学状态和过程并不符合逻辑规范，就这个意义来说，这种见解是对的。心理学包含很多逻辑学以外的东西。但是，重要的是：任何对我们有意义的逻辑都不能包括人的智力所不能包括的东西，也就是不能包括人的神经系统所不能包括的东西。所有的逻辑，都因人的智力在进行所谓逻辑思维时的局限，而受到限制。

例如，有许多数学理论专门从事关于无限的讨论，但这些讨论和它们相应的证明事实上都不是无限的。任何一种可以接收的证明都包含有限数目的步骤。不错，运用数学归纳法所作的证明似乎包含无限个步骤，但这只是表面的。事实上，它包含下列有限个步骤：

---

① Turing, A. M., "On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem", Proceedings of the London Mathematical Society, Ser. 2, **42**, 230-265(1936).

② 此处维纳抱有操作主义的哲学观点。——俄译者注

(1) P_n 是对应于数 n 的一个命题;

(2) P_n 对 $n=1$ 的场合已经证明了;

(3) 如果 P_n 是真的,P_{n+1} 就是真的;

(4) 因此 P_n 对每个正整数 n 都是真的。

自然,在我们所作的逻辑假设中,必须有一个证明论证有效的假设。然而,这里的数学归纳法和关于无限集的完全归纳法远不是一回事。对于更严格的数学归纳法形式,例如某些数学部门中的超限归纳法,情形也是如此。

这样,就会发生一些有趣的情况:我们也许能够——只要有足够的时间和够用的数学手段——对定理 P_n 的每一单独场合予以证明;但是,如果我们没有系统的方法把这些证明归诸一个与 n 无关的论证,例如像数学归纳法那样,我们也许就不能对所有的 n 来证明 P_n。在所谓元数学中就承认有这种特殊的情况,这个部门主要是由高德(Gödel)及其学派发展起来的。

一个证明表示一个用有限步骤达到确定结论的逻辑过程。但是,一个遵从确定规则的逻辑机器并不必要达到结论。它可以通过不同阶段不断运转,永不终止,这时它可以或者是描画出一个愈来愈复杂的活动图案,或者是进入一种反复过程,如同一盘棋在行将终局时由不断的"将军"构成的连续循环一样。在康德和罗素的悖论中,就有这种情形。让我们来考虑由所有的自身不是自身的元的类构成的类。这个类是不是自身的元呢?如果是,那么肯定它不是自身的一个元;如果不是,那么同样又可以肯定它是自身的一个元。计算机在回答这个问题时,会不断作出相间的答案:"是","不是","是","不是",一直下去,不能稳定下来。

罗素解决自己的悖论的方法,是给每个状态规定一个量,叫做型,根据命题所涉及的对象(无论这些对象是最简单意义上的"事物",或者"事物"的类,或是"事物"的类构成的类,等等)的特性,罗素用型这个量来区别形式上似乎相同的命题,我们现在也用对每个命题规定一个参数的方法来解决这种悖论,这个参数就是命题陈述的时间,在这两个场合下,我们可以把引进的量都叫做均匀化参数,它用来解除仅仅由于我们的疏忽而产生的迷惑。

由此可见,计算机的逻辑和人的逻辑十分相似,根据图灵的意见,我们可以用它来说明人的逻辑。计算机是否也有比较高级的人类特征——学习能力呢?为了看出它也可以有这个特性,让我们来考虑两个彼此密切相关的概念,即观念联合的概念和条件反射的概念。

在英国经验哲学学派中,从洛克到休谟,都把人的心灵内容看成是由某种东西构成的,洛克把这些东西叫做观念,休谟则把它们叫做观察或印象。他们假设,简单的观念或印象存在于纯粹被动的心灵中,心灵对它所包含的观念没有影响,如同一块干净的黑板对可以写在上面的记号没有影响一样。他们又假设,由于某种内在活动(很难叫做力),这些观念根据类似原则、邻接原则和因果原则而联成一束。在这些原则中,最重要的也许是邻接原则:一群观念或印象往往在时间中或空间中一同出现,它们具有一个唤起另一个的能力,因此其中任何一个的出现就会招致整群的出现。

总之,这里包含一种动力学意义,但是动力学观念到现在还没有从物理学渗透到生

物学和心理学。18世纪典型的生物学家是林耐(Linnaeus),他是一个搜集家和分类学家,他的观点与今天的进化论者、生理学家、遗传学家和实验胚胎学家的观点十分对立。的确,面对着世界上这么许多材料要去考察,当时的生物学家们的精神面貌很难不如此。同样,在心理学中,心理内容的概念压倒了心理过程的概念。现在还有人认为名词是本质的而动词的重要性不大,这大概是经院式地强调实体的遗风。虽然如此,但是,像巴甫洛夫的工作这样的例子表明,从这些静力学观念跨向今天更具动力学的观点的步伐,还是很明显的。

巴甫洛夫的工作很多是在动物上进行的而不是在人身上进行的,他研究的是可见的动作,不是内省精神状态。巴甫洛夫发现,食物能引起狗的唾液和胃液分泌增加。如果在有食物而且仅仅在有食物时,给狗看某个可见物体,那么在没有食物时,它看到这个物体也能刺激唾液或胃液的流出。洛克由内省观察到的由于观念邻接而发生的观念联合,现在变成了类似的行为方式的联合。

然而,巴甫洛夫的观点和洛克的观念之间有一个重要区别,这完全因为洛克考虑的是观念而巴甫洛夫考虑的是动作方式。巴甫洛夫观察到的应答,是促成实现一个能产生成功结果,或是避免灾害的过程。唾液对咽下食物和消化都有重要的意义,而避免痛苦的刺激能使动物不遭到躯体上的损伤。因此,在条件反射中一定参与了某种东西,可以把它叫做情调(affective tone)。我们不必要把它和我们自己的苦乐感觉联系起来,也不必要把它抽象地和动物的利益关系联系起来。重要的问题是,情调是按某种尺度,从负值——“痛苦”——向正值——“快乐”来变化,情调的增加在相当长时间内或者永远地有利于神经系统当时进行的全部过程,并使这些过程具有进一步增加情调的二次能力;情调的减少则倾向于抑制神经系统当时进行的全部过程,并使这些过程具有进一步减少情调的二次能力。

当然,从生物学上说,较大的情调主要应当出现在有利于种族繁荣的场合,虽然这对个体不一定有利;而较小的情调主要应当出现在不利于种族繁荣的场合,虽然这对个体不一定有害。任何不符合这个要求的种族,都要走上卡诺尔的“牛油面包上的苍蝇”的道路,最后总要灭亡。然而,即使是一个走向灭亡的种族,只要它还继续存在,情调机构仍然有效。换句话说,即使具有最自杀性的情调配置的种族,它也有确定的行为方式。

我们要注意,情调机构本身就是一个反馈机构。我们甚至可以用图解把它表示如下:

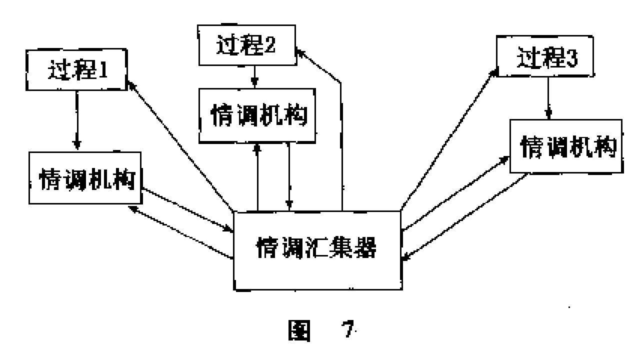


图 7

这里,情调汇集器按照某种规则把各个分散的情调机构在过去短时间内发出的情调

结合起来,我们现在不必要来说明这种规则,从汇集器返回到各个情调机构的线路,是用来根据汇集器的输出,改变各个过程的固有情调,这种改变一直保持到有新的消息来自汇集器才有新的变化。从汇集器返回到各过程机构的线路,在总情调增加时,用来降低阈值;而在总情调减少时,则用来提高阈值。这些线路也是长时间性的,一直等到另一个来自汇集器的冲动到来,才有所改变。然而,这个延长作用只限于在返回消息到达的时候实际存在的那些过程才具有。对各个分散的情调机构的效应,也有类似的限制。

我想强调一下,我不是说,条件反射的过程就是按照我所描述的机制进行的;我不过是说,它可以这样进行。但一旦假定了这种机制或其他类似的机制,我们就能谈到许多有关它的问题了,其中一个问题是,这种机制是能够学习的机制,我们已经了解,条件反射是学习的机制,这个观念在行为主义者研究老鼠在迷宫中学习时就已经采用了。当老鼠在迷宫中时,全部的关键在于:在我们所用的诱导或惩罚中,分别具有正的和负的情调,实际情形肯定是这样的,因为受试者不是简单地用先验的考虑而是根据经验来学习情调性质的。

研究这样一种机制也是相当有趣的:这种机制能将一定的消息群,不经过神经系统而送到所有处在接收它们的状态的那些元件上去。这些消息群可以是从情调汇集器返回来的消息,在一定程度上,也可以是从情调机构到汇集器的消息。汇集器不一定要是一个独立的元件,它可以仅仅代表一种作用,这种作用能将来自各个情调机构的消息加以自然的结合,这些"敬告所有与此事有关者"(to whom it may concern)式的消息,完全可以用最低的装置成本,通过其他非神经性通路,最有效地发送出去。例如,通常一个矿区的通信系统都包括一个电话中心站以及相应的线路和各种装置。当发生紧急状态要人们都离开矿区时,我们不是依靠电话中心站来发消息的,而是靠打破通风人口处的硫醇[①]管来使人们获得消息的。像硫醇或像荷尔蒙这类的化学送信者,对于不是发给特定接收者的消息说,是最简单最有效的送信者。现在让我插进一个看着像纯粹是空想的问题。荷尔蒙活动所具有的那种易于引起感情和激动的性质是很令人深思的。这并不意味纯粹神经机构不能是情调的机构和学习的机构,而是意味我们在研究心理活动这方面时,不能不看到荷尔蒙传递消息的可能性。在弗洛伊德(Freud)的理论中,把记忆——神经系统的储存功能——和性活动这两方面概括到一起,可是如果把上面的看法和这个学说联系起来,大概就是极端的空想了。一方面是性,另一方面是全部的感情内容,有一个很强的荷尔蒙要素把两者联结起来。性和荷尔蒙的这个重要性是莱特文博士和塞尔弗烈兹先生向我提到的。虽然现在还没有适当证据来证明这个说法的正确性,但原则上显然不是荒谬的。

在计算机的性能中,并没有什么阻碍它显示条件反射的东西。我们要记住,一个在动作中的计算机,不仅是设计者设计在其中的替续器和储存机构的联结。它还包含计算机储存机构所储存的内容,这个内容在机器一次运转的过程中是不能完全清除掉的。我们前面提到,与其说计算机的整个机械结构和个体生命相当,不如说它的一次运转和个体生命相当。我们也提到,在神经计算机中,信息所以能长期储存起来,很可能是由于突

① 硫醇——一种氧被硫所替代的醇,具有恶臭的液体。——俄译者注

触透过率的改变;我们完全能够建造一个用这种方法储存信息的人工机器。例如,我们能够使任何消息进入储存系统时,以一种经久性地或半经久性的方式,改变一个或若干个真空管的栅偏压,这样就改变了引起真空管接通所必需的脉冲总数。

更详细地考虑计算机和控制机构中的学习装置及其用途,不宜由这本入门性质的书来做,最好把这个工作交给工程师去做,在本章以下的部分中,谈谈现代计算机的几个已经成功的普通用途,也许更合适些。计算机的主要用途之一就是解偏微分方程。当数据涉及正确地表示两个或两个以上变数的函数时,即使对线性偏微分方程,要编制它们也需要记录大量的数据,因为精确地描述两个变数或多个变数的函数需要很多数据。对双曲线形方程,例如波方程,典型的问题是当给定初始数据时求方程的解,我们可以从初始数据顺序地得到以后任何给定时刻的结果。对抛物线形方程,大多数场合也是如此。对于自然数据是边界值而不是初始值的椭圆形方程,求解的自然方法包括一个逐步近似的累进过程。这个过程需要反复进行许许多多次,因此,像现代计算机的那些高速方法是不可缺少的。

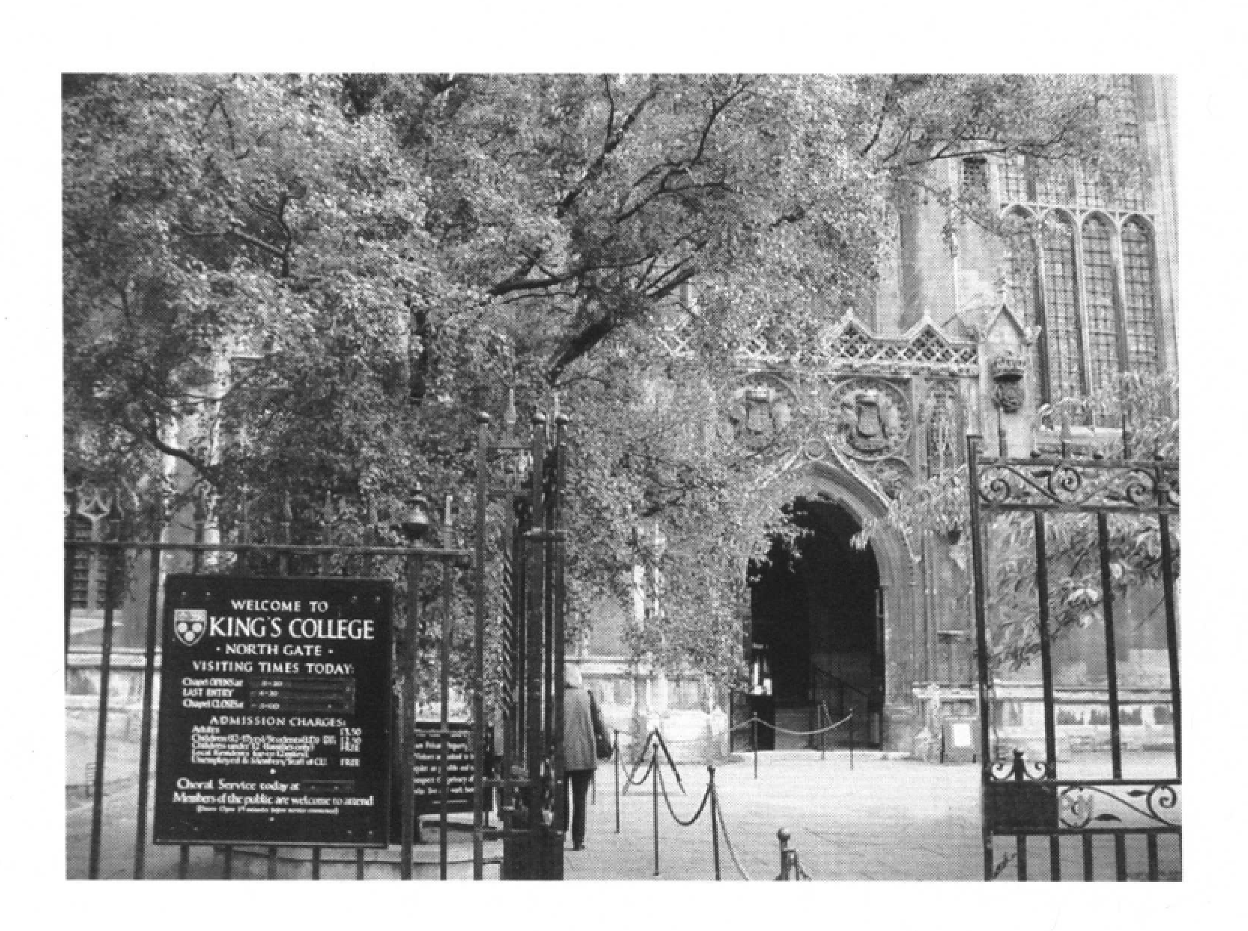
在非线性偏微分方程场合,不像线性微分方程那样有一个合理有效的纯数学理论。这时,计算机方法不仅对处理特殊情形下的数字解显得十分重要,而且,正如冯·诺伊曼指出的,在为了熟悉大量的特例以便建立一个普遍理论时,它也是必要的。在一定程度上,我们已经借助价格高昂的实验仪器实现了这个要求,例如借助于风洞。我们就是通过这个途径了解到冲激波、滑脱面、湍流等等现象的许多极其复杂的性质,而对于这些现象,我们还根本没有建立一个适当的数学理论。究竟还有多少尚未发现的类似现象,我们不知道。模拟计算机的准确度比数字计算机的要小得多,在大多数场合下也慢得多,因此,后者在将来是大有指望的。

现在已经清楚,使用新的计算机要求它特有的纯数学技巧,这种技巧和运用笔算或容量较小的计算机时所使用的完全不同。例如,在使用能计算中等高阶的行列式的计算机时,或使用能解 20 个或 30 个联立一次方程的计算机时,我们要遇到在研究低阶的类似问题时所不会发生的困难。除非在处理问题时非常小心,不然,我们完全可能丢掉任何有效数字的解。一般认为,像快速计算机这样精密的有效工具,如果掌握在没有足够熟练技巧来充分利用它的人手中,是不能发挥它的力量的。快速计算机少不了需要具有高度理解水平和技巧训练的数学家。

在计算机的机械结构或电结构中,有几个原则应当加以考虑一个原则是,有些比较经常用到的机器,像加法机或乘法机,应当装配成只适合某一特定用途的相对标准化的形式;那些不经常用到的机器则应当在要用到它时,由一些也能用到其他目的的元件来凑成。与此密切相关的另一个原则是,在这些通用的机构中,各个部件应当根据它的通用性来得到利用,不应当把它们固定地和其他装置特定地联系起来。机器中应当有一部像自动电话交换台那样的装置,能够自动寻找空着的组成部件和各种连接器,并且在需要它们的时候将它们接通。这样,就会大大避免由于机器中大量元件不经常使用而产生的很大浪费,因为这些元件只能在用到整个机器时才用得上。我们将看到,这个原则对我们考虑神经系统的运输问题(traffic problems)和过载是很重要的。

最后要指出的一点是,一个巨大的计算机,无论是机械装置形式的,或电装置形式

的，或是大脑本身，都要浪费掉大量功率，所有这些功率都被废弃掉了，并且都逸散为热，从大脑中流出的血液，要比进入大脑的血液温度高几分之几度。没有任何一种计算机的能量消耗接近大脑这样经济的程度了。在 Eniac 或 Edvac 这类巨大的计算机中，真空管灯丝消耗的能量是以千瓦计的。如果没有适当的通风和冷却设备，计算机就要出现一种和机械上发热病相当的状态，直到机器的参数由于热度而发生根本的改变，以致停止运转。但是，机器每个操作的能量消耗还是小得几乎可以不计，甚至不能成为机器运转的有效度量。机械大脑不能像初期唯物论者所主张的“如同肝脏分泌胆汁”那样分泌出思想来，也不能认为它像肌肉发出动作那样能以能量的形式发出思想来。信息就是信息，不是物质也不是能量。不承认这一点的唯物论，在今天就不能存在下去。


WELCOME TO
KING'S COLLEGE
· NORTH GATE ·
VISITING TIMES TODAY:
LAST ENTRY
ADMISSION CHARGES:
Choral Service today at
Members of the public are welcome to attend

第六章

完形和普遍观念

· VI Gestalt and Universals ·



维纳在清华从未间断他的科学研究工作，他讲课的内容有些就是他正在研究的问题，有时讲课也像是在搞研究工作，常常是写满一黑板公式之后，他突然叫起来“不对！不对！”便统统擦掉，或说道“对了！对了！”高兴得笑起来。他在学校发表过几篇论文，登在1935年和1936年的清华大学《理科报告》上，是以电机系和数学系教授头衔发表的。


WHO GAVE THEIR LIVES
1941

上一章讨论的各个问题中有这样一个问题，即是用洛克的观念联想学说来说明神经系统机构的可能性。洛克认为联想是按照邻接原则(principle of contiguity)、类似原则和因果原则进行的。因果原则曾经被洛克，尤其是被休谟归结为经常伴随着发生的事物，因而可以归并到第一个原则——邻接原则中。至于第二个原则——类似原则，需要作比较详细的讨论。

当我们侧看、斜看或正看一个人面孔的时候，我们怎样把握他的容貌的同一性呢？一个圆，无论是大的或小的、远的或近的，无论是在垂直于从眼球到圆心这一直线的平面上，因而看来是个圆，或是在其他方位上，因而看来是个椭圆，我们怎样判定它是一个圆呢？从天上云朵或罗夏测验(Rorschach test)①的墨污中，我们又怎样看出了人面、动物或地图呢？这一切都是关于眼睛方面的例子，别的感官也有同样的问题，而且有些问题牵涉到各感官之间的关系。我们怎样用语言来表现虫鸣鸟叫？我们又怎样通过触觉来认出一块硬币的圆形呢？

我们暂且把探讨范围限在视觉方面。当我们比较不同对象的形状时，眼睛和肌肉的相互作用确是一个重要的因素，无论这里所讲的肌肉是眼球内部的肌肉，或是使眼球转动的肌肉，或是使头部转动的肌肉，或是使整个躯体转动的肌肉。的确，一定形式的视觉-肌肉反馈系统即便在像蠕虫这样低等的动物界中也是重要的。蠕虫的背光性(negative phototropism)，即回避光线的倾向，似乎是由两个感光器官来的冲动的平衡来控制。这个平衡反馈到躯干上的肌肉，躯体就避开了光；当它再和一般向前运动的冲动结合时，就会把动物带到附近最黑暗的地方。注意到下面一点是很有趣的：如果我们将一对带有放大器的光电管、一个用来平衡这对光电管的输出的惠士通电桥和另外一些用来控制两个电动机(推动双螺旋桨机构用的)的放大器等部件组合起来，就可以给一条小船装上一套非常合用的背光控制装置。要把这个装置缩小到蠕虫可以携带的程度，当然是困难的或不可能的；然而，我们这里只不过是再举一个例子来说明读者们早已熟悉的一个事实：生命体机构的空间尺度比最精巧的人造机构要小得多，但在另一方面，由于使用了电子技术，人造机构在速度上就大大超过了生命体。

让我们撇开各个中间阶段，立即考虑人的眼-肌反馈问题。有些反馈纯粹是自动调节性质的，例如：瞳孔在暗处放大和在亮处缩小，就是要把进入眼睛的光流量限制在一定范围内，使得明暗的变化不至于太大。另一些反馈与以下的事情有关：即人眼把它对于形状和色彩感觉的最敏锐部分，非常经济地局限在相当小的中央凹上；对于事物运动的知觉的较敏锐的部分则局限在网膜边缘。当边缘视觉把亮的、明暗对照强烈的或色彩鲜明的，特别是运动着的对象捕捉到以后，就有一个反射的反馈把对象带到中央凹。跟着这个反馈系统出现的是一个有相互联结的副反馈的复杂系统，它引导两个眼球移动，使得

① 罗夏测验——瑞士心理学家罗夏所提出的一种心理技术测验。这种测验，根据受试者从墨水污点中看出的图画，来判断他的智力倾向。例如，看出野兽的图画就与思想的刻板有关。——俄译者注

◀麻省理工学院主楼内厅

吸引我们注意的对象落到每个眼睛的视野的相同部分,同时调节晶状体的焦点尽可能地使对象的轮廓变得明晰,除了这些动作以外,头部和躯体也做一些补充动作,如果单靠眼睛的运动不能把对象带到视野中心来,或者当其他感官发现了视野以外的对象时,这些运动能够把它引进视野。除此以外,我们习惯于从一定方向来考察各种对象——诸如笔迹、人面、风景等等,这里也有一种把对象推向特定方向的机构。

所有这些过程可以总结为一点:我们要把任何吸引我们注意的对象放在标准的位置和方向上,从而使我们所形成的视像能够在尽可能小的范围内变化。这些并非是我们知觉事物的形态和内容的全部过程,但是它确实便利了我们为了达到这个目的而后来进行的一些过程。这些随后的过程是在眼内和视觉皮质上进行的。我们有大量的证据说明:就这个过程的大多数阶段来说,每个阶段中用来传递视觉信息的神经元通道的数目都在减少,同时把视觉信息逐步地变为接近于我们在记忆中使用的和保存的形式。

在视觉信息汇集的过程中,第一步是网膜和视神经之间的过渡。应当记住:中央凹的棒细胞与锥体细胞几乎是和神经纤维一一对应的,但在边缘上,一条视神经纤维可以和十个乃至更多个的末梢器官相对应。这一点是容易理解的,只要我们考虑到这样的事实:边缘纤维的主要功能不在于视觉本身,而在于为眼睛的定中心、聚焦和导向机构找到对象。

视觉的最惊奇的现象之一就是我们认识轮廓画的能力。譬如说,一幅人画的轮廓画和面部本身在色彩或明暗部分上显然没有多少共同点,但它可以是这个人的最像的画像。对于这种现象,最合理的解释是:在视觉过程的某个阶段,轮廓被强调起来,而影像的其他部分的重要性则被减少到最低限度。这些过程的起点是眼睛。和所有感官一样,网膜也有适应作用:一个持续的刺激会使网膜接收和传递该刺激的能力减弱下来,对于那些纪录具有不变的色彩和照度的一大块影像的内部状况的感受器说来,适应作用表现得最为明显,因为即使是焦点和凝视点有些轻微的波动(这在视觉中是不可避免的),也不会改变我们所得到的影像的性质。但是,在两个对照区域的边界上,情况就完全不同了。在这里,焦点和凝视点的移动就会产生交替的刺激,这种交替,如同我们在余像中看到的情况一样,不但不使视觉机构因适应作用而反应减弱,反而提高了它的感受性。无论这两个邻接区域之间的对照是光强的对照抑是色彩的对照,上述情况都存在。要解释这些事实,我们应该看到:视神经中有 3/4 的纤维只在发光体"闪"光时才有反应。因此,眼睛得到事物的最强印象的部位是在边界上,而且事实上,每个视像都具有某种素描的性质。

也许这种作用不全是边缘感觉的作用。在摄影术中,我们知道,一块感光板经过多种处理后可以增加它的明暗对照;这些非线性的现象肯定没有超出神经系统所能做到的范围。我们可以把这些现象和我们以前提到的电报上所用的中继器联系起来看。和电报上所用的中继器相似,在视觉现象中,这种中继器使用一个尚未模糊到超出一定程度的印象去引发(to trigger)一个具有标准明晰度的新印象。无论如何,这种现象减少了一个影像所携带的无用信息的总量。这也许跟大脑视觉皮质区域各层中传导纤维数目减少的部分有关。

以上我们把视觉印象产生的过程分解为几个实际的或可能的图式化阶段。我们使

我们的影像结聚在注意的焦点的附近，并把这些影像或多或少地简化为轮廓。其次，我们把它们作相互的比较，或者至少把它们和储存在我们记忆中的标准印象——例如"圆"或"正方形"——作比较。比较的方法可以有多种。我们前面已经做过一个概略的说明，指出洛克关于联想的邻接原则如何可能用机械来实现。我们应该看到邻接原则在很大程度上包括了洛克的类似原则。我们常常通过下述过程，看到同一对象的不同方面：把对象带到注意的焦点和进行一些其他的动作，使我们能在这个或那个距离，这个或那个角度看到对象。这是一个普遍的原理，不限定在特殊的情况才能使用，而且在比较我们的更为复杂的经验的时候无疑是很重要的。但是，就我们基于视觉得到的普遍观念或者如洛克所讲的"复合观念"的形成看来，上述过程未必是唯一的。我们视觉皮质的构造是高度组织化的、特殊化的，如果认为它的操作是由一个非常一般化的机构来进行，那是不对的。它给我们这样的印象：在我们面前的是一个特殊机构，这个机构并不简单是由一些可以通用的元件和一些可以互换的部件临时配合起来的，相反，它是一个如同计算机的加法装置和乘法装置那样固定的部分装置。在这种情况下，研究一下这个部分装置可能是怎样工作的和我们应该怎样把它设计出来都是值得的。

一个对象的所有透视变换构成了我们在第二章已经定义了的所谓"群"。这个群又定义几个变换子群：只由那些不涉及无穷远区域的变换所构成的仿射群；围绕一给定点的均匀膨胀变换，亦即这个点和坐标轴方向以及所有方向上的标度均匀性都保持不变；长度保持不变的变换群；围绕一个点旋转的二维和三维的旋转群；所有的平移群等等。以上所讲的子群都是连续群，也就是说，它们的运算决定于在某种相应空间中连续变化的参数值。因此，它们在 n 维空间中形成多维构形，同时，含有在这个空间中构成区域的所有变换子集。

普通二维平面中的一块区域，被电视工程师所讲的扫描过程扫过时，这整块区域是由在该区域中近于均匀分布的一组表样点(sample positions)来代表。同样，群空间的每个区域连同整个群空间也可以用一个群扫描过程来表示。在这个不限定在三维空间内使用的扫描过程中，空间内网状分布的一组点被一个一元序列所扫遍，而且这些网点应当这样来分布，使得在适当定义了的某种意义上说，它们能接近区域中每一个点。因此，这个网所包含的点可以根据需要接近于任何一组被挑选出来的点。如果这些"点"或参数集实际用来生成相应的变换，那么，用这些变换来变换一个给定图形的结果，可以任意接近于对这图形的任何给定的由一存在于指定区域的变换运算子来实现的变换。如果我们的扫描十分精细，如果被变换的区域具有被研究的群所变换的区域的最大空间尺度，那么，经过扫描变换所得到的区域，与对原来的区域作任一变换所得的区域，其重叠的程度可以根据我们的需要达到其面积的任意大的一部分。

因此，我们可以从一个标准的比较区域和一个用来和它比较的区域出发。在变换群扫描的任何阶段上，如果被比较的区域在某个扫描变换下形成的像，比给定的允许限度还要完满地叠合在标准形象上，那么就把它记载下来，并且说这两个区域是相似的。如果在扫描过程的任何阶段上都不发生叠合，我们就说这两个区域是不相似的。这个过程完全可以机械化起来，作为识别图形形状的一种方法，而与图形的大小、方向以及与包含在被扫描的群区域中的是何种变换无关。

如果这个区域不是群的全部，那就可能这样：区域 A 看来和区域 B 相似，区域 B 看来和区域 C 相似，但区域 A 看来和区域 C 不相似。这种情况实际会发生的。至少，就直接印象（一种不包含任何高级过程的印象）说来，一个图形可以和它的倒图形没有任何特别相似之处。但是，在这个图形倒转的每个阶段上，可以有一个相当范围的邻接位置和它相似。按照这样方式形成的一些普遍“观念”并不是绝对区别开的，而是彼此有交叉的。

使用群扫描从群变换中抽象出普遍观念还可以有其他一些较为复杂的方法。我们这里考虑的群都是有“群测度”的，即由变换群自身决定的概率密度，而群中所有的变换被该群中的任一特定变换左乘或右乘而发生变化时，它仍然不变。我们可以用这样的方式扫描一个群：令一个相当任意性的区域的扫描密度——即扫描变元扫遍该区域的时间总和——和群测度非常近于正比例的关系。在这种均匀扫描的情况下，如果有任一个量依存于群变换的元所构成的集合 S，如果这个集合被群的全部变换所变换，我们把这个依赖于 S 的量表示为 $Q(S)$，并用 TS 表示集合 S 被群变换 T 变换的结果。这样，当我们用 TS 代替 S 时，则 $Q(TS)$ 就是代替 $Q(S)$ 的量值。如果我们对变换群 T 的群测度求这个量的平均或积分，则得一个量，可以写成如下的形式：

$$\int Q(TS)\,\mathrm{d}T \tag{6.01}$$

这里是对群测度求积分的。量(6.01)对于在变换群作用下的所有可以相互交换的集合 S 都是恒等的，也就是说，对于所有一定意义上的集合 S，这个量都有同一的形态和完形。如果(6.01)中的积分不是对整个群来积分的，如果被积函数 $Q(TS)$ 在被略去的区域数值很小，那么，我们就可以对形态作一近似地比较。关于群测度要说的就是这些。

近些年来，人们十分关心用一种感官来弥补另一种感官的缺陷的问题。在各种弥补缺陷的尝试中，最引人注目的就是使用光电管的盲人读字器的设计。我们假定这方面的尝试只限于印刷物，甚至只限于一种或几种字形。我们还假定把页面放平正、对准字行以及从这一行到下一行的移动等是用人手或自动地进行，后一种是可以实现的。我们可以看到：这些过程与我们依靠肌肉反馈，并使用正常的对准、定向、调准焦点以及使两眼一致的装置而得到视觉完形的过程相当。进一步的问题是要在扫描装置顺序地扫过各个字母的时候测定它们的形状。有人主张按垂直方向依次安排几个光电管，这些光电管各自与不同音调的发音装置相联结。这可以对字母黑色部分用不发音或发音来记录。假定我们采取这个办法，并假设三个光电管接收器一个接一个地叠起来。令这些接收器像一个弦的三个音调一样来描述字母，字母上部为高音，下部为低音。于是，大写字母 F 可以记作：

———————— 高音持续的时间；
—————— 中音持续的时间；
———— 低音持续的时间。

大写字母 Z 记作：

————
——；
————

大写字母 O 记作：

　　——

——　——；

　　——

等等。加上我们理解能力的帮助，这种听觉符号不是太难读的，譬如说，不会比盲人用的凸字更难读。

但是，这一切决定于一个条件：光电管群和字母上下的高度要有适当的关系。我们知道，即使是标准字形，它们的大小还是很不相同的。因此，扫描在垂直方向的标度应当可大可小，以便把字母的印象变为标准印象。至少，我们应有一些通过人工或自动的方法来实现的属于垂直方向的膨胀变换群的变换装置。

有几个办法可以达到这个目的。我们可以使光电管作垂直方向的机械调节。另一个方法是把大批的光电管垂直排列并随字形大小改变音调的分布，使得位在字形上面和下面的那些光电管都不发音。这可以如图 8 所示的办法来实现，我们可以用两组接线来构成线路，在这个线路中，从光电管出来的输入线连到一串愈来愈散开的电开关上，各垂直线则是输出线。

图中单线表示从光电管出来的导线，双线表示接到音频振荡器上去的导线，虚线上圆圈表示传入和传出导线之间的连接点，虚线本身表示用来开动某一组音频振荡器的导线。这就是我们曾经在导言中提到的麦卡洛克设计的用作调节字形高度的装置。在最初设计时，虚线之间的选择是靠人手来进行的。

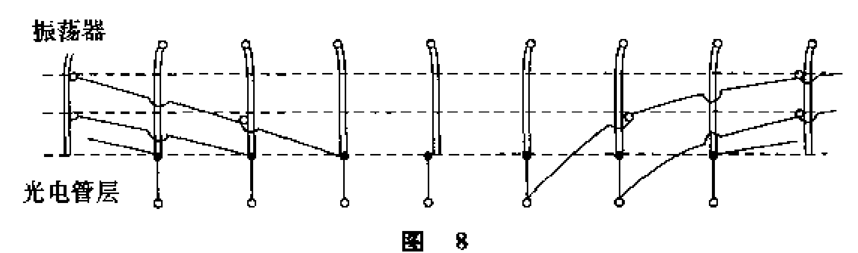


图　8

冯·波宁博士看到这个图形后，说它相当于视觉皮质的第四层，连接的圆圈相当于这一层的神经细胞体，这些神经细胞体是分布在各子层中，其分布的水平密度作均匀的改变，而子层的大小则随密度的增加而缩小。水平方向的导线能够按照某种循环的次序被激发(fired)。全部装置看来完全适合于群扫描的过程。当然，还必须有一个随时将上部的输出加以重新结合的过程。

这就是麦卡洛克建议的实际用来探究大脑中视觉完形的仪器。它是一部可以用做各种群扫描的典型仪器。其他感觉的情形也和视觉相似。在人耳中，从一个主调到另一个主调的音乐转调无非就是频率对数的转移，因而也可以用群扫描的装置来进行。

因此，群扫描机构有它确定的、对应的解剖学上的结构。所需要的开关动作，可以借助于一些专门的水平导线来实现，这些导线提供足够的刺激来改变各层的阈值，使得当某一导线与该层接通时，可以通过阈值的改变，来调节引起该层细胞达到兴奋状态所合适的刺激量。虽然我们不知道这个机器运转的全部详细情况，但是不难猜想出一个与解剖学结构相一致的一种机制。总而言之，群扫描机构完全可以成为大脑的一种固定部件，它相当于数字计算机中的加法器和乘法器。

最后，扫描装置应该具有一定的固有的操作周期，这个周期应该与大脑的整个动作相一致。这个周期的大小程度应当是直接比较大小不同的对象的形状时所需的最短时间。只有当两个对象大小相差不太悬殊的时候，这种情形才有实现的可能，否则，扫描过程就是一个长时间过程，需要由一个非专门机构来完成。如果能够直接比较对象，则需要的时间为 1/10 秒数量级。这和在循环序列中刺激所有横向连接线层所需要的刺激时间在数量级上似乎也是一致的。

虽然这个循环过程是一个可以局部决定的过程，但我们有证据证明皮质各部分有普遍的同步性，可以设想这是由某个计时中心驱动的结果。事实上，脑动电流记录图(electroencephalogram)表明：它的频率和大脑 α 节律(rhythm)固有的频率的数量级相同。我们可以猜想 α 节律和形状知觉有关，它具有扫描节律的性质，就像电视机扫描过程所显示的周期性一样。这种现象在熟睡的时候消失了，当我们注视某一物体的时候，的确如我们所猜想的，它似乎被其他节律混扰和叠盖了，扫描节律成了其他节律和其他活动的负载者。值得注意的是：当我们在清醒的时候闭着两眼，或者像在瑜伽(Yogi)的抽象环境中那样凝视着一无所有的太空[①]，这时候的 α 节律具有一种近似完全的周期性。

如上所述，我们看到感官补缺的问题把原来由某一损坏的感官所传递的信息由一健康的感官代替传递的问题——是一个重要的而且不一定不可解决的问题。使得这个问题更有希望得到解决的事实是：由一种感觉所正常激发的记忆区域和联想区域并不是像一把钥匙开一把锁那样只属于这种感觉，而是可以用来储存这种感觉以外的其他感觉所提供的印象。一个盲人，如果不是天生的，他不但可以保留瞎眼以前的视觉记忆，而且能够以视觉形式储存触觉和听觉的印象。当他在室内走动时，他不但能摸索出自己的道路，而且对房子还有一个看起来应当如何的视像。

因此，盲人可以得到部分正常的视觉机构。另一方面，他损失的不仅是两只眼睛：他还损失了运用视觉皮质部分(它被认为是构成视觉印象的固定机构)的能力。因此，要弥补他的缺陷，不仅要用人造的视觉接收器，而且要用人造的视觉皮质，以便把这个新接收器上的光印象翻译为与他的视觉皮质的正常输出相关连的形式，使得通常看来是相似的对象现在变为听来是相似的对象。

因此，判定用听觉代替视觉是否可能至少部分地是与皮质各层上可以加以区别的视觉模型和听觉模型的数量之间的比较有关。这是信息量的比较。鉴于感觉皮质的不同部分具有组织上的某种类似，大脑皮质的两个不同区域之间的面积比较作为判定的根据可能不会相差很远的。视觉与听觉面积之间的比例大约是 100：1。如果听觉皮质全部用于视觉，我们可以期望得到的信息接收量大约相当于通过眼睛得到的信息量的 1%。另一方面，我们估计视力的通常标准是对某形象获得某种程度的分辨能力的相对距离，因此，1%的视力就是正常情形下 1%的信息量。这是非常低的视力，但是，肯定还没有全瞎，具有这样程度的视力的人也不自认为是瞎子。

从另一个角度看，这个图景甚至是更有利的。仅仅用 1%的视力就可以代替听觉去识别全部听觉的细微差异，还留下大约 95%的视力，可以说视觉基本上还是完整的。因此，感官补缺问题是一个非常有希望的研究领域。

---

① 瓦尔特(W. Grey Walter)博士自英国布列斯特的私人通信。

第七章

控制论和精神病理学

· VII Cybernetics and Psychopathology ·



维纳很喜爱音乐，好吃素餐的甜食。他特别爱吃花生米，有时简直有点孩子气，一面走路一面吃，高兴时还把花生米抛得高高的，随后张着嘴巴接着吃。他在清华大学时，与中国师生相处得十分融洽，经常在系馆（科学馆）与中国教员下棋，有时高兴得叫起来“I eat up your one”（我吃掉你一个子）。

他很喜欢学中文，那时一般把他的名字 Wiener 翻译成“温诺”或“温讷”，他常常要别人用中文写出来。后来学校特地在清华西门外请了一位老先生教他中文。平时，他也经常学说中国话，用“您好”“早安”打招呼，回国时，他已经能说一些中国话了。后来，在美国，他见到中国人或东方人，常常爱用中国话打招呼，或说上几句中国话。



METROPOLTAN STAGE
FIRE RO OF
WAREHOUSI
METROPO TAN
CITY CAB 536-5100

在开始写这一章时，我必须先交代一下。一方面我既不是一个精神病理学家，也不是一个精神病治疗家，我缺少关于这个领域的任何经验，而在这个领域里，经验的指导是唯一可靠的指导。另一方面，我们关于大脑和神经系统的正常动作的知识，还远远没达到可以信赖一个先验理论那样完善的地步，更不要说关于它们反常动作的知识了。因此我想事先放弃那种主张，即认为任何具体的精神病理学的现象，例如克拉帕林（Kraepelin）及其学派所记载的那些症状，是由于像计算机一般的大脑组织的特殊故障产生的。谁要是根据本书的一些观点得出这个特定结论，那就由他自己负责。

然而，如果认识到大脑和计算机有许多相同之处，这就可以给精神病理学，甚至精神病治疗学提供一个新的有效的研究方法。这方面的研究也许可以从所有问题中最简单的一个问题开始：大脑是怎样避免由于个别部件失灵而引起动作上的重大错误和重大失败的？对于计算机，类似的问题具有重大的实践意义，因为计算机的运算过程可以延续进行几小时或几天，而每个运算操作的时间却不到百万分之一秒。很可能，一次计算操作的过程包含 10^9 个运算操作步骤。在这种情况下，即使弄错一次运算也绝不是可以忽视的。虽然，现代电子学仪器的可靠性事实上已经大大超过最大胆的估计。

在通常用笔算或用台式计算机来进行的计算工作中，照例要把每一道计算步骤都检验一下。在找到了错误的时候，就从发现错误的地方开始一步步往回推算，去寻找错误的所在。如果要一部高速计算机来做检验工作，检验工作就要进行得同机器的计算速度一般快，否则，机器的整个有效速度将降低到较慢的检验过程的速度。此外，如果机器要把计算的全部中间结果的记录都保存起来，那么它的复杂程度和体积都将增加到不可容忍的地步，很可能比原来的大两倍或三倍。

一种更好得多的检验方法，也是实际上常用的一种方法，就是每一道运算同时交给两套或三套分别的机构去做。在用两套机构的时候，它们能够自动地相互校对答案；如果发生差异，所有的数据就都移存到永久性记忆装置里去，计算机停止动作，并且给操作者发出产生了差错的信号。然后操作者比较两者的结果，根据结果寻找那个出了毛病的部件，也许是一个真空管烧坏了，需要更换，如果每一阶段都用三套分别的机构，由于实际上出一次毛病的机会是很稀见的，三套机构中总有两套的答数一致，这个一致的答数就是所求的结果。在这种情况下，校验机构接收多数答案，机器不需要停止，只给出一个表示少数答案和多数答案在哪里发生差异和怎样发生差异的信号。如果在发生差异的最初瞬间就发出信号，那么差错地点可以十分准确地被指示出来，在一架设计良好的计算机里，一个元件并不是只固定担负一连串运算中的某一特定步骤的工作，而是在每一步骤中都有一个很像自动电话交换机中使用的搜索过程，它会寻找出某一种立即可以使用的元件，把它接进运算序列中去。这样，拆卸和调换损坏了的元件就不会耽误大量时间。

我们可以设想而且相信，神经系统中至少也存在两套进行这个过程的元件。我们不能设想任何重要的消息可以交给单个神经元去传递，或是把任何重要操作交给单一的神经机构。像计算机一样，大脑可能也是按照类似卡诺尔在“猎取蛇鲨”的故事里所说的那

◀麻省理工学院内的街道

个原则进行工作的，这个原则就是："我告诉你三次的就是真实的"。如果认为传递信息的各个通路就是通常把信息从一端传到另一端，中间没有任何吻合，那也是不确实的。更可能的是，当消息到达了神经系统的某一级时，它可以通过所谓"神经元丛"(internuncial pool)中的多个不同途径由这一级中的一点到下一级去。诚然，神经系统中也有那样一些部分，这种可更替性受到很大限制或根本没有，它们大都是大脑皮质中高度专业化的、作为外感觉器官的内延伸的部分。但是，对于大脑皮质区域中担负着联想作用和所谓高级精神机能的好些比较不专业化的部分，上述原则仍然成立，而且可能更显得突出。

直到这里，我们考虑的是正常活动中的差错，这只是广义上的病态动作。现在我们来谈一谈更明显的病态动作。精神病理学多少使抱着本能的唯物主义观点的医生感到失望，他们总认为每种症状必然伴随着某个特定组织中物质方面的损伤。不错，有些大脑的特殊损伤，例如外伤、肿瘤、血栓等等，可以引起精神症候；也有些特定的精神病，例如不全麻痹，是一般躯体性疾病的后遗症，并伴随脑组织的病变，但是对于严格的克拉帕林型精神分裂症患者，或是躁郁狂精神病患者，或是妄想狂病患者，我们却无法从患者的大脑病变来分辨它们。我们把这些疾病叫做机能性疾病；这种区分方法似乎违反了现代唯物主义的教条，现代唯物主义认为，任何一种机能失调必定在有关组织上存在某种生理学的或解剖学的根据。

机能性疾病和器质性疾病的这种区别，可以从计算机的研究中得到很多启示。我们已经看到，和大脑——至少和成人的大脑——相当的，不是计算机的空洞的物质构造，而是这一构造同运算过程开始时所给的指令以及同运算过程中储存起来的和从外界得到的附加信息的结合。这种信息是以某种物理形式——记忆的形式——储存起来的，但其中一部分属于循环记忆的形式，具有随着机器的停闭或脑子死去而消失的物理基础；而另一部分则是长期的记忆，它的储存方式我们现在只能加以猜测，但可能它也具有随着死亡而消失的物理基础。我们现在还没有方法在尸体上认出一个给定突触在生前具有多大的阈值；即使我们知道了这一点，我们也无法追寻出同这个突触相接通的神经元和突触所形成的链，以及作为记录思想内容的这条链的意义。

因此，把机能性精神失常基本上看做记忆的疾病，看做大脑在活动中所保持的循环信息的异常，看做突触的长时间透过率(long-time permeability)的异常，也没有什么奇怪。甚至在不全麻痹这种极其严重的疾病中，大部分症候也不是由于有关组织的破坏和突触阈值的变化产生的，而是由于最初的伤害所必然引起的消息传导的次级混乱、剩下的神经系统和其他消息传递通路的过度负荷所产生的。

在一个包含大量神经元的系统中，循环过程是难以长期保持稳定的。或者就像"仿佛现在"这种记忆过程，循环过程在进行中或者逐渐被削弱，终于消失；或者它们要牵动愈来愈多的神经元，直到占用了神经元丛中过大的一部分。后一情形大概就是焦虑性精神病中见到的恶性忧虑的原因。在这情形下，病人的脑子里可能没有空余的地方，即没有足够数目的神经元去进行正常的思索。在这种状况下，也许大脑中的未病的神经元的负担会少一些，因此它们更容易被逐渐扩大的过程牵扯进去。而且，经久性记忆也愈来愈深地受到影响，起先病理过程还在循环性记忆这一级上，后来就可能在经久性记忆这一级上一再顽固地出现。这样，当初只是比较轻微而偶然地破坏了的稳定状态，逐渐就

可能完全破坏正常的精神生活。

在机械或电子计算机中，也并不是找不到类似性质的病理过程。齿轮上某个轮齿可以和同它衔合的轮齿错开，以致再不能同它恢复正常关系。一个高速电子计算机可以发生似乎无法中止的循环过程。这种意外的起因就是由于这个系统中出现了某种非常不容易发生的瞬间状态，在修理以后，它也许永远不再发生或以后极少发生。但是，当它们发生的时候，就会暂时使机器失灵。

在使用计算机时，遇到这种意外怎么办呢？我们想要做的第一件事，就是洗去机器中的所有信息，希望它在计算别的数据时不再发生故障。若是这样做无效，如果发生故障的地点是信息清洗机构永远或暂时不能达到的，我们就要把机器摇晃一下，或者如果是电气机器，就将异常大的冲击电压送人机器，希望能达到原先不能到达的部分，以便改变它的状态，使它的错误循环活动中止。如果这也失败了，我们可以切断机器上发生故障的部分，因为剩下来的部分可能还是足够应用的。

但是，除了死以外，没有一个正常的过程可以完全清洗大脑中所有过去的印象；而在死亡以后，就不可能再把脑开动起来。在所有正常过程中，睡眠最像是非病理的清洗了。我们知道，要摆脱一种恼人的焦虑或是思想混乱，睡眠一下是最好的方法。这种情况是多么常见呵！然而，睡眠并不能洗掉较深的记忆，真的，相当恶性的焦虑状态不是用适当睡眠所能驱除的。因此我们常常被迫采用一种剧烈得多的干扰记忆循环的方式。这些方式中更剧烈的是施行大脑外科手术，而手术后将遗留下永久性的伤害和毁损，并且将永远削弱受害者的能力；因为哺乳动物的中枢神经系统似乎没有任何再生的力量。这方面已经采用的一种主要外科手术是前额叶切除术，这种手术是把前额叶大脑皮质的一部分切除或孤立起来。施行这种手术目前已经很流行，这也许是因为这一方法会使许多病人比较容易看护吧。让我顺便说一句，杀了他们就更容易看护！然而，前额叶切除术对于恶性忧虑似乎有真正的效果，并不是由于它能帮助病人更接近解决他的问题，而是由于伤害或是破坏他保持忧虑的能力（在另一种时行的术语中，把这种保持忧虑的能力叫做良心）。更一般地说，这一方法从各方面限制了循环性记忆——即把当前已不存在的情况保持在记忆中的那种能力。

各种形式的休克疗法——用电、胰岛素、五甲烯四氮唑，都是一些比较不激烈的治疗方法，也起着极相似的作用。它们不破坏大脑组织，或至少不以破坏大脑组织为目的，但是它们肯定地能破坏记忆力。因为这些方法只涉及循环性记忆，而且因为在精神失常发病初期主要是循环性记忆受到损伤，而循环性记忆值得保存的价值又不大，所以休克疗法比起脑叶切除术来肯定是值得推荐的。但是它对经久性记忆和个性不是绝对不起有害的作用。按目前的情况来看，它是制止精神上的恶性循环的另一个剧烈的、没有完全了解的、不能完全控制的方法。但是，这点却没有妨碍它在许多病例中仍然作为目前可以采用的最好的方法。

前额叶切除术和休克疗法用来治疗病情比较深的经久性记忆方面的疾病，虽然也可能有些功效，但按其本质说，更适合于治疗带恶癖性质的循环性记忆疾患和恶性焦虑。我们已经说过，当精神失常迁延很久时，经久性记忆也像循环性记忆一样受到严重的扰乱。我们似乎没有任何纯粹药物学的或外科的武器可以有区别地作用于经久性记忆。

这正是应该由精神分析和其他精神疗法来插手的地方。无论这种精神分析是正统的弗洛伊德意义上的或是经过江格和亚特勒修改过的意义上的，或者它是不严格属于精神分析的精神疗法，这种治疗仍然清楚地根据如下的一个概念：储存在心中的信息，位于不同的级上（就其可以接触的难易来分的），它比直接的没有别的专门方法帮助的内省法所能发掘的要更丰富和多样；它总是被内省法所不能发觉的那种情绪经验强有力地制约着，内省法其所以不能发觉，或者是因为这种经验用成人的语言仍然无法表示出来，或者是因为它被一般是不随意的情绪的特定机构包藏了起来。这些被储存的经验的内容以及它们的情调，基本上规定了我们以后的心理活动，有时这种规定可能带有病态的方式。精神分析家的技巧就是用一系列的方法去发掘和解释这些潜伏的记忆，使病人实事求是地承认它们，并且通过这种承认去纠正它们，纵然不纠正它们的内容，至少也纠正它们所带的情调，从而减轻它们的危害程度。所有这些都完全同本书的观点一致。这也许还能说明，为什么在某些情况下要联合使用休克疗法和精神疗法，即对于神经系统中的反响现象（phenomena of reverberation）把物理疗法或药理疗法和治疗长期性记忆的精神疗法结合起来，因为这种记忆如果不加以干涉，就可能从内部把休克疗法所破坏的恶性循环重新建立起来。

我们已经提到神经系统的信号传导问题。许多著者，例如汤姆普逊[①]曾经提到过各种形式的有机体的大小都有一个上限，超过这个界限它就不能活动。例如昆虫机体的大小是由呼吸孔通过直接扩散作用把空气送到呼吸组织中去的呼吸管长度决定的。陆上动物不能大到它的腿或其他和地面接触的部分被它自身的重量所压坏；限制一棵树的高度的是把水和矿物从根部输送到叶子，同时把光合作用的产物从叶子输送到根部的那套机构；其他的例子还有。在工程建筑物中，也可以见到同样的现象。限制摩天楼的高度的是这样一种情况：当它超过一定高度的时候，给上面各层准备电梯所需要的面积占据了下层横截面的过大部分。用具有一定弹性的材料修建的最好的吊桥，如果支柱之间的距离超过一定程度，它就会被自身重量所压塌；用一定材料建造的任何建筑物，如果超出一定的跨度，都会被自身重量所压坏。同样，根据一个固定的、不能再扩张的计划建成的一个电话局的大小，也是受到限制的，电话工程师极透彻地研究了这种限制。

在电话通信网中，用户觉得无法把电话叫通的那一段极短的时间就是重要的限制因素。如果叫通的机会是99%，就是最苛求的人也一定会满意的；90%能叫通，这大概也算够好了，因为办起事情来还算相当便利。75%的接通机会就够麻烦的了，但是还可以勉勉强强地办事情；如果一半电话都叫不通，用户就会要求拆掉电话。这是总的数字。如果电话要通过 n 个分别的接通步骤，各个步骤的接不通的概率是互不相关而且是相等的，那么要使总接通概率为 p，则每个步骤的接通概率必须是 $p^{1/n}$。因此，要在经过五个步骤后得到75%的接通机会，每个步骤的接通概率必须大约为95%。要得到90%的接通率，每一步骤的接通概率必须是98%。要得到50%的接通概率，每一步骤的接通率必须是87%。这里可以看出，当牵涉到的步骤愈多时，如果通话双方的数目超过某一临界值，整个通话的情况就愈容易急速地变坏；相反，只要通话的数目没有达到这个临界值，

① Thompson, D' Arcy, On Growth and Form, Amer. ed., The Macmillan Company, New York, 1942.

通话的情况就良好。例如，一座包括许多步骤的并且设计出一定接通率的交换站，在通话数目到达临界点以前，没有显著的阻塞情况，但是一到临界点，它就完全失灵，我们也就遭到灾难性的通信阻塞。

比起所有动物来，人有最发达的神经系统，人的行为可能是依从于那些有效地动作着的神经元链中最长的一种链，因而人很可能是在过度负荷的边缘上有效地完成着复杂的行为，一旦越过这个边缘，他就会完全崩溃。过度负荷的产生有下列几种形式：或者由于必须传送的信号量过多，由于传导信号的路径在物理上被减少；或者由于不需要的信号系统（例如增加到病理性忧虑程度的循环性记忆）过多地占用了这些通道。在所有这些情况下，都会——突然地——到达这样一点：没有给正常的信号留出足够的传导通道，因而就会出现例如像疯狂那样的突然的精神错乱。

这里首先受影响的是那些最长的神经元链的机能和活动。有证据说明，这些机能和活动正是那些在我们通常的评价标准中被认为是最高级的过程。证据如下：大家知道，在生理限界以内的体温上升能够使大多数（即使不是全部）的神经元的活动更为顺利。在较高级的（其次序大致按照我们通常对“高级”的程度的评价）过程中，这种影响也较大。因为一个神经元是同别的神经元连成一串的，在单一的神经元-突触系统中，过程的任何促进作用都应该具有累积的性质。因此，某一神经活动过程由于体温上升而得到的总活动能力，可以粗略地作为有关的神经元链的长度的量度。

我们由此理解到，人脑所使用的神经元链比其他动物要长一些，这就说明为什么人类的精神错乱肯定地最为显著，并且可能也是最常见的。还有一个更特殊的方法来考虑与此极类似的问题。让我们考虑两个从几何学意义来说相似的脑子，它们的灰质和白质的重量的比例相同，但有不同的尺寸，其比例是 $A:B$。假设两个脑子中灰质的细胞体体积和白质的神经纤维截面都是同样大小。于是，那两个脑子的细胞数目的比例是 $A^3:B^3$，长距离联结器数目的比例是 $A^2:B^2$。这就是说，当它们的细胞中动作密度（density of activity）相同时，大的脑子神经纤维中的动作密度比小的脑子的神经纤维中的动作密度要大，其比例是 $A:B$。

如果我们拿人脑同低等哺乳动物的脑去比较，我们就发现人脑的折叠较多。两者灰质的相对厚度差不多相等，但人脑的灰质一直分布到复杂的脑回和脑沟里。这种分布使灰质的数量增多而使白质的数量减少。在一个脑回中，白质的减少主要是纤维长度的缩短，而不是纤维数目的减少，因为一个脑回的对折比它们假如在一块面积大小相同没有折叠的平滑表面上互相间要靠近得多。另一方面，各个脑回之间的连接线所必须经过的距离则由于脑的折叠而多少有所增加。因此，人类脑子的近距离连接线颇为有效，而远距离干线则并不完善。这就是说，在发生信号阻塞时，最先受到影响的是联系相互远隔的大脑各个部分的那些过程；也就是说，在精神错乱时，那些牵涉到几个中枢，牵涉到一系列运动过程，牵涉到许多联合区域的过程是最不稳定的。这些过程正是我们通常叫做较高级的过程，因此我们那些似乎有经验支持的猜测得到了再一次的证实：在精神错乱时，较高级的过程最先恶化。

还有一些迹象，说明脑中的长距离径路一般有穿出大脑外侧并横切低位中枢的趋势。这是可以用割断那些担任远距离联结的大脑白质的一部分弯曲而只发生极轻微损

害这一事实来证明的。看起来，这些表面的联结是如此的不妥善，它们之中只有一小部分才是实际需要的。

关于这点，考虑一下惯用左手或右手以及半球优势的现象是很有趣的。在低等哺乳动物中，似乎也有习惯用右侧肢体或左侧肢体的现象，虽然比起人来，这些现象很不显著，这部分地也许是因为动物动作中要求的组织性和灵巧性较低。但是，即使在较低级的灵长类中，右侧和左侧肌肉熟练程度的差异程度比起人类来，也要来得小。

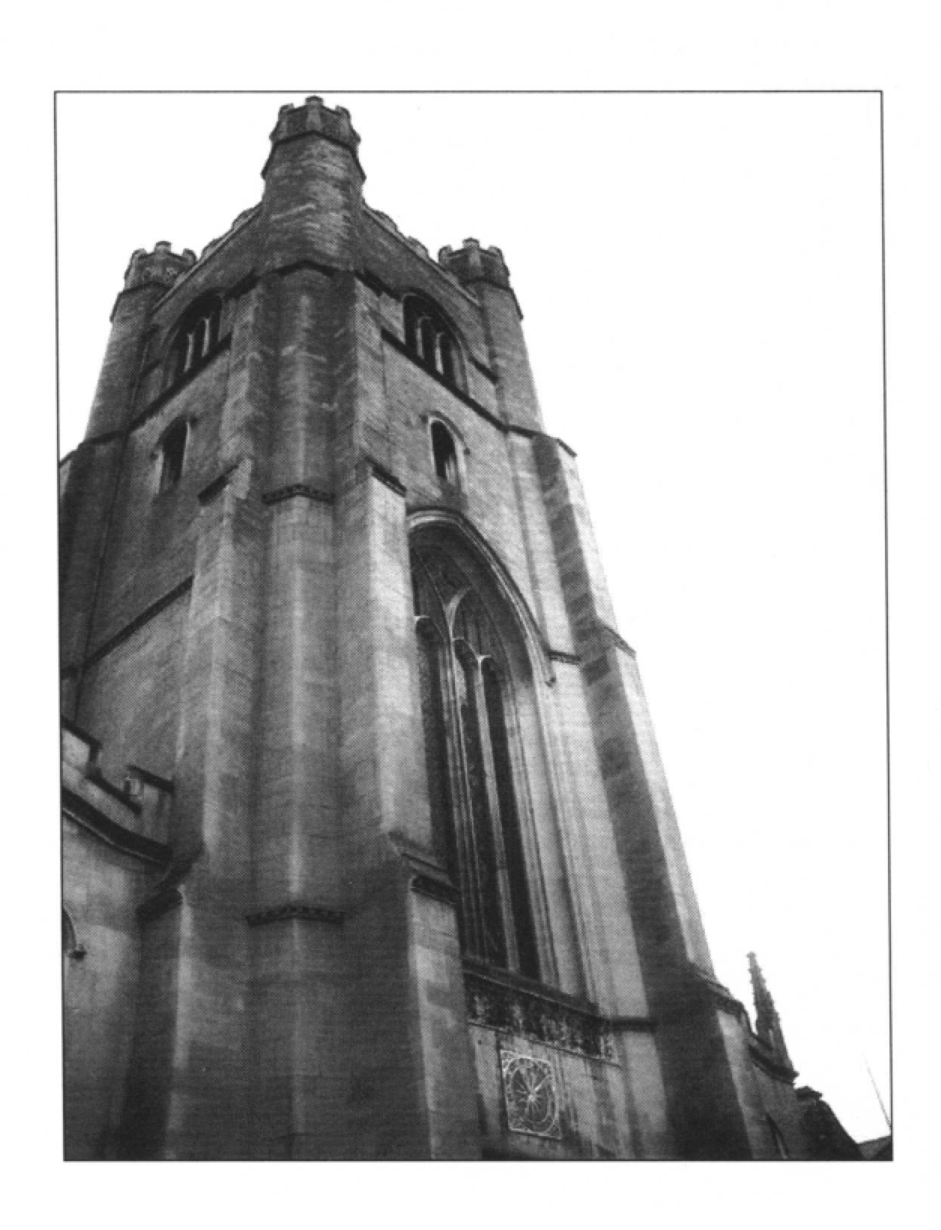
大家知道，一个正常的人惯用右手一般是由于他惯用左脑，而少数人惯用左手则是由于他惯用右脑。这就是说，大脑功能不是平均地分布在两个脑半球上的，其中一个脑半球是优势脑半球，它执行着绝大部分的比较高级的功能。不错，许多本质上是两侧性的功能——例如关于视野的——在其所属的各个半球中都出现，虽然并非所有两侧性功能都是如此。但是，大部分"较高级"的皮质区域都限制在优势半球上。例如，在成年人身上，因为劣势半球上广泛损伤而产生的影响比起优势半球上类似损伤所引起的影响要小得多。巴士特(Pasteur)在少年时期患过右侧脑溢血，使他得了中度的一侧麻痹，即半身不遂。在他死后剖验他的脑子时，才发现他的右脑损害是如此广泛，以致有人说，在他患了脑溢血后，"他只有半个脑子"。在他的颅顶和颞颥区肯定有广泛的损伤。然而他在受到这种伤害以后，仍然完成了几件最好的研究工作。在一个惯用右手的成年人身上，左脑的同样损伤几乎一定会致命，而且一定会使病人智力上和神经上都成为残废，使他变得像动物一般。

据说，这种情况如果发生在初生时期就要好得多。在出生后头6个月中，优势半球受到广泛的损伤会迫使正常的劣势半球去代替它；因此，比起那些在较大年龄时受到脑部损伤的病人来，这种病人看来更接近于正常。这是同出生后头几周中神经系统所表现的巨大可变性和以后发展的巨大固定性相符合的。在幼童身上，即使没有这种严重的损伤，一侧惯用性可能也是富于可变性的。然而，在儿童入学以前很久，这种天然的一侧惯用性和大脑某半球占优势的情况已经被终生确定了。常常有人认为，惯用左手在社会上会遇到重大的不便。这话有些道理，因为大多数工具、课堂桌子、运动设备主要都是为惯用右手的人做的。而且，在过去，有人由于迷信而厌恶使用左手的习惯，正如他们厌恶那些稍稍背离一般人的常态的东西，例如胎记和红发。由于各式各样的动机，许多人想通过教育去变更自己孩子的惯用左手的外表习惯，而且甚至得到成功，虽然他们不能变更某一大脑半球占优势的生理基础。以后他们才发现这些优势半球变更的孩子很多都患口吃，并且在言语、阅读、书写方面都发生障碍，甚至严重地影响他们的前途并丧失正常生活的希望。

现在我们至少看到这个现象的一个可能的解释。在训练劣势的手的时候，劣势半球上像支配写字这类灵巧动作的区域也受到一些训练。然而，因为这些动作的实现是同阅读、讲话和其他动作具有最密切的联系的，而这些动作却都同优势半球不可分割地联结在一起，因此，在这一过程中，神经元链必须从一个半球穿到另一个半球，然后又回来。而在一个稍微复杂的过程中，它们就必须一次一次地来回穿行着。但是，像人脑那样大的脑子中，脑半球之间的直接联结器——大脑连合(cerebral commissures)——的数目是如此之少，以至它们很少起作用。因而大脑半球之间的联络必须绕着远路而通过脑干，

我们对于脑干还了解得很不完全，但它肯定是长的，不粗的，可以被阻塞的。其结果，同言语和书写有关的那些过程极易发生信号阻塞现象，而口吃的发生也就最自然不过的了。

这就是说，就有效地利用那些从解剖学上看似乎存在的各种机能这一点来说，人的脑子可能已经太大了。在猫身上，优势半球的破坏比起人身上优势半球的破坏来似乎产生的害处较少，而劣势半球的破坏也许对它的害处更大。无论如何，猫的两个脑半球上的机能分配大体上是相同的。在人身上，由于脑的尺寸和复杂性增加而得到一些益处，部分地被大脑中在同一个时候只有很小一部分能被使用这一限制所抵消。这样来思索一下是很有趣的：我们可能面临着自然界的限制之一，我们的器官从高度专门化到效能衰退，最后到物种消灭。人类的脑子可能是沿着这条毁灭性的专门化道路前进，正像恐龙的巨大鼻、角一样。



第八章

信息、语言和社会

· VIII Information, Language, and Society ·



1937年7月，日本发动了“卢沟桥事变”，开始了全面侵华战争。维纳谴责日本的侵略行径，呼吁美国给予中国必要的援助。这时，维纳了解到由于战争爆发，使正在上海访友的李郁荣不能回到北平，只得在上海找到一个职业，并靠自己的积蓄和他在艺术方面的才能生活。这造成了李郁荣在科学方面的发展在这个本来应当最有作为、最为关键的时期骤然中断，维纳为这个重大的损失而倍感忧虑。在当时纷乱的时局下，怎样处理这种局面的问题大大加深了维纳的烦恼。他尽了很大努力想让李郁荣来到美国，但没有成功。


MASSACHVSETTS INSTITVTE OF

一个组织中的各个要素本身也是小的组织；这样一个关于组织的概念既不是生疏的，也不是新颖的，古希腊关系松弛的联邦、神圣罗马帝国及其同时代的类似组成的封建国家、瑞士联邦、尼得兰联邦、美利坚合众国以及中南美的许多合众国、苏维埃社会主义共和国联盟，这些都是政治领域内类似教阶(hierarchies)关系的组织系统的例子。霍布士的利维坦(Leviathan)，即是由非完美无缺的人组成的"世人的国家"，它说明同样一种思想，只是组织程度上较低一些；而莱布尼兹的思想，认为生命机体其实是充满了其他生命机体(如血球)的综合体，也是在同一方向上更前进了一步。这种思想实际上不过是细胞说的哲学先驱，细胞说认为大多数普通大小的动植物，以及所有的大动物、大植物都是由许多单位，即细胞构成的，这些细胞都具有独立的生命机体的许多属性，即使不是所有的属性，多细胞机体本身可以成为建造较高级机体的砖块，例如僧帽水母就是由特殊分化了的水螅组成的一个复合体，其中有些个体已经为了要担任营养摄取、个体保持、运动、排泄、生殖和支撑整个群体等任务而发生各种变化。

严格地说，这种生理上相联结的群体所提出的组织问题，从哲学上看并不比低级阶段的个体所提出的组织问题更为深刻。在人和其他社会动物身上——例如一群狒狒或一群牛，群栖的海狸，蜂群，一窝黄蜂或一窝蚂蚁——情况就大不相同了。团体生活所表现的整体化程度接近于单一个体的行动所表现的水平，但个体大概有固定的神经系统，神经系统的各元件之间都有永久性位置关系和永久性联系，而团体却是由许多时空关系可以不断变动，没有永久的、不可破的肉体联结的个体所组成的。一窝蜂的全部神经组织就是一只一只蜜蜂的神经组织；蜂群是怎样一致行动的呢？而且这种一致行动又怎么能富于变化、富于适应性和组织性呢？显然，秘密在于蜂群的成员之间有相互的通信。

这种相互通信的复杂性和内容可以大有不同。人的相互通信包括全部复杂的语言和文献以及许多其他东西。但对蚂蚁说，相互通信大概只是少数几种嗅觉。如果说一个蚂蚁能够把一只只的蚂蚁都分辨清楚，这大概是不可能的。蚂蚁肯定能够分辨自己窝里的蚂蚁和别的窝里的蚂蚁，它可以同这只蚂蚁合作，把那只蚂蚁杀死。除了这类少数的外部反应以外，蚂蚁的智慧几乎同它被角质包裹起来的身子一样，是定型的、僵化的。这就是为什么我们事先可以料到，一个动物它的生长期乃至学习期同它成长后的活动期会截然分开的原因。这类动物的唯一通信方法就像体内的荷尔蒙通信系统一样，是一般性和扩散性的。的确，作为一种化学感觉的嗅觉一般都没有方向性，它同体内的荷尔蒙作用没有什么两样。

这里我要插上几句话。哺乳动物中的麝香、麝猫香、海狸香等等具有性吸引力的物质可以认为是社会性的、外部通信用的一种外部荷尔蒙，特别对于孤独生活的动物，这些物质能够在适当时期把异性吸引在一起，因而是繁殖种族所不可缺少的东西，我并不是说这些物质一旦到达嗅觉器官以后，起的是荷尔蒙作用而不是神经性作用。如果说它们少到仅仅能够觉察的分量还会起纯粹的荷尔蒙作用，这是难以理解的。但是从另一方面说，我们对荷尔蒙作用知道得太少了，因此不能否认极少量的这些物质也有发挥荷尔蒙

◀麻省理工学院晶体物理和电子陶瓷实验室

作用的可能性。而且，麝香素和麝猫香素中由碳原子构成的长而屈曲的环无须大大改组就能构成性荷尔蒙的连锁环，以及某些维生素和某些癌元所特有的连锁环。我不想在这点上发表意见，让大家来做这个有趣的猜测吧！

蚂蚁闻到各种气味后所采取的行动，看来是极度标准化的，而一个单纯刺激（例如传递信息的气味）的价值不但取决于刺激本身所传递的信息，还取决于刺激的发送者和接收者的整个神经机构。假如我在森林中遇见一个聪明的野蛮人，他不会说我的言语，而我也不会说他的言语。即使我们中间没有共同的、事先约定的语言符号，我仍然能够从他那里知道许多东西。我只要留心他显出激动或高兴的表情的那些时刻。然后我向四面八方观察，最好特别注意他的目光所投射的方向，把我看到的或听到的东西牢牢记住。不久我就会找出他所关心的东西，这不是由于他用语言把那些东西告诉了我，而是因为我自己观察到那些东西。换句话说，一个没有固有内容的信息，由于他在那个时候注意到它而在他心中产生意义，也可以因为我在那个时候也注意到那个信号而在我心中产生意义。他能发现我对某些事物特别注意的那个瞬间，这种发现能力本身就是语言，它就像我们两人能够得到的印象范围那样具有多种多样的可能性。因此，社会动物在产生语言以前，也许早就有一种活泼的、能懂的、富于变化的通信方式。

不管一个种族用什么通信方式，这个种族所使用的信息量总是可以测定的，并且可以把对种族有用的信息量同对个人有用的信息量区别开来。当然，对个人有用的信息并不就是对种族有用的信息，除非它能改变个人对于其他人的行为，而且这种行为还可能没有种族的意义，除非别人能把这个行为同其他的行为形式加以区别。因此，要决定某一种信息是属于全族的还是纯粹对个人有用的，就要看个人所采取的行动方式是否被种族中其他成员看做特定的行动方式，以及是否能逐一影响这些成员的行动等等。

我提到种族。这个名词对于大多数社会团体的信息的作用范围来说，确实过于广泛。本来，团体的界限只相当于团体信息能够有效地传递到的那个界限。我们可以给团体定义一种测度，只要比较一下从外界给予这个团体的判断数目和团体内部作出的判断数目就可以做到这点。我们可以借此来测定这个团体的自治程度。一个团体有效大小的测度，就是这个团体达到一定自治程度所必需的大小。

一个团体比起它的各成员来可以有更多或更少的集体信息。暂时集合的一群非社会性动物，即使它的个体成员有很多信息，也只有很少的集体信息。这是因为一个成员的行为很少受到别的成员的注意。别的成员很少因此动作起来再继续传播影响。另一方面，在人类组织中却完全有可能比它的任何一个细胞有多得多的信息。因此，在种族、部族或团体所有的信息量与个人所有的信息量之间，没有哪一类一定多，哪一类一定少的关系。

同个人所有的信息一样，种族在某一时期使用的信息也不是无须经过特殊努力就能得到的。大家知道，图书馆由于自身藏书过多而有难以活动的趋势；科学也因为发展到如此的专业化程度，以致专家们一越出自身精细的专业便常常毫无所知。布什博士建议利用机械的方法去寻找浩如烟海的文献资料。这些机械方法可能有用，但是它们也是受到限制的，因为除非某专家已经确认某一本新书应该属于哪一部门，否则我们就不可能在分类的时候把这本书分到哪个部门里去。如果两门学科的方法和内容相同，但分属于

两个远隔的学术领域，那么分类工作就几乎需要像莱布尼兹那样兴趣广泛的人来担任。

联系到团体信息的有效量问题，必须指出：社会政治组织中，最令人惊异的一个事实就是它极度缺乏有效的内稳定过程。有一种信仰在许多国家都流行而在美国更几乎成为国教。这个信仰说，自由竞争本身就是一种内稳定过程：在一个自由市场里，交易者的个人自私性，即每人尽可能地设法卖贵买贱，最终将使价格趋于稳定，并且有利于最大多数人的利益。这是和一种极乐观的看法有关的，这种看法就是：当某个企业家在设法增进自己的利益时，在某种形态上他多少也是公众的一个恩人，因此他理应得到社会给予他的巨额报酬。不幸的是，事实驳斥了这种简单的理论。市场是赌局，实际上，它就像是垄断资本的家族赌场。因此，它严格地服从冯·诺伊曼和摩根斯特恩所发展的一般博弈理论。这个理论的基础是假定每个参加博弈的人在每一阶段上根据他当时得到的信息，使用一种完全理智的策略来进行博弈，这种策略保证他最终能得到期望中的最大可能报酬，因此，市场上的赌博是由完全理智的、完全无情的赌手来进行的。即使在只有两个赌手的情况下，这一理论也很复杂，虽然这个理论常常使博弈进行的路线是死板的。然而，在许多有三个参加者的场合，以及在绝大多数有很多参加者的场合，博弈的结局就非常难于确定也非常不稳定。各个参加者由于本身的贪欲不得不结起同盟，但这种同盟一般并不能使他们采取统一的、决定性的行动，而是常常以互相出卖、背叛和欺诈告终，这种情况在较高级的商业界生活中或是极为类似的政治、外交和战争生活中太常见了。这种情形长此下去，即使最聪明的最无原则的唯利是图的人也会倾家荡产；如果这些唯利是图的人对此生厌，同意和平共处，最大的报酬就会落到那个等待时机以便撕毁协定、出卖同伴的人身上。这里没有任何的内稳定作用。大家都被卷入繁荣和衰落的商业周期中，卷入接二连三的独裁制和革命中，卷入那种人人受到损失的战争中，这是当前时代的一个真正特征。

当然，冯·诺伊曼把博弈者看做完全理智的、完全无情的人，这是一种抽象，也是对事实的歪曲。一大群十足聪明、十足无原则的人互相钩心斗角，这是十分稀见的。当骗子聚集在一起的时候，一定也会有傻瓜。当傻瓜聚集得相当多的时候，他们就给骗子提供更为有利的剥削对象。傻瓜的心理已经成为很值得骗子去认真注意的题目。傻瓜并不是按照冯·诺伊曼的博弈者的行为方式去寻求自己的最终利益，他的行动是可以预测的，就像迷宫中的老鼠一般。这一种说谎方法——即不说真话——会使傻瓜去购买某一种牌子的香烟；那一种说谎方法可以引诱他去投某个候选人——任何候选人——的票，或者去参加政治迫害，如某一政党所希望的。把宗教、色情文学和伪科学恰当地配合起来就能推广某一画报的销路。某种甜言蜜语、贿赂和恐吓的混合物会引诱一个年轻的科学家去研究导弹或原子弹。为了把这些事情办成，我们有一套机构去调查无线电听众的意见，去举行选举测验，去进行舆论抽查以及其他的心理研究；而且总会有统计学家、社会科学家、经济学家把自己的一套本领出卖给这些事业。

对我们说还算是幸运的，因为这些说谎的商人和这些使得容易受骗的人们遭殃的剥削者的伎俩还没有达到炉火纯青的境界，还没有使他们能够为所欲为，这是因为没有一个人是十足的傻瓜或是十足的骗子。一个普通人同他直接关心的东西打交道的时候总是有些理智的，对于公共利益或是自己亲眼见到的别人的苦难总是有些利他精神的。在

一个已经存在很久的因而具有划一的理智和行为水平的小小乡村社会里，人们对不幸者的关怀，对路政和其他公共事业管理，对于一再地违反社会规则的人的容忍态度方面，都有一个很可尊敬的标准。这些人终究是存在的，别的人总得继续同他们一起生活。另一方面，在这样的社会中，对那些老想高出他人一头的人是不合适的。有种种方法使他感到社会舆论的重压，经过一个时期，他会感到这种舆论是如此的无所不在，如此的不可避免，如此的限制人和压制人，以致他为了自卫起见而不得不离开这个社会。

因此，小而紧密地结合着的社会有极大程度的内稳定性，不管这种社会是文明国家中的具有高度文化的社会或是原始野蛮人的村落，都是一样。纵然许多野蛮人的习俗在我们看来是奇怪的，甚至是令人厌恶的，但它们一般都有极明确的内稳定性价值，人类学者的一部分任务正是要去解释这点。只有在大的社会里，那些大亨们才可以靠财富使自己免于饥饿，靠隐居和埋名改姓逃避社会舆论，靠诽谤法和拥有各种通信工具来抵制私人批评；只有在这样的社会里，残忍才能到达它的最高峰。对于社会所有这些反内稳定的因素来说，通信工具的控制是最有效也是最重要的。

本书的教训之一就是，任何组织所以能够保持自身的内稳定性，是由于它具有取得、使用、保持和传递信息的方法。在一个过于大的社会里，社会成员无法直接相互接触。因此，出版物（包括书籍和报纸）、无线电、电话网、电报、邮递、剧院、电影院、学校、教堂就都成了取得、使用、保持和传递信息的工具。它们除了具有作为通信方法这个内在重要性以外，还有其他的次要作用。报纸是广告的工具，也是给报纸老板赚钱的工具；电影和无线电也是一样。学校和教堂不仅是学者和圣人的庇护所，还是“大教育家”和主教的家。一本不给出版家赚钱的书大概是不会付印的，而且肯定是不会再版的。

我国的社会是以买卖为基础的社会，这是大家公认的，在这里，无论自然资源或是人力资源都被认为是具有足够魄力去剥削这些资源的第一个实业家的绝对财产，通信工具的次要方面愈来愈侵占它的主要方面。由于通信本身日益精巧并且需要更多费用，这就更加助长了上述的情况。乡村报纸虽然可以使用自己的记者去采访村子里的消息，但是它要出钱去购买国内新闻，去购买由报业辛迪加发行的特写和“铅板”式的千篇一律的政论。无线电台依靠广告得到收入，谁给钱谁就来点曲子，到处都是一样，大的新闻采访部花钱太多了，一个中等资本的出版商是供给不起的。书籍出版家集中出版那些可能一下子被读书俱乐部全部包买下来的书籍。大学校长和主教，即使他们没有取得个人权力的野心，也得维持一个非常花钱的机构，他们只能到有钱的地方去找钱。

因此，从各方面看，通信工具都受到重重约束：赚钱少的被代之以赚钱更多的，而这些工具都掌握在极少数的富人阶级手里，因而自然是表达这个阶级的意见的，因为通信工具是取得政治和个人权力的一种主要手段，它们首先吸引来的是那些对这种权力抱有野心的人。什么通信系统比所有别的系统应该对社会内稳定性更有贡献，它就直接被掌握在那些最醉心于争权夺利的人的手中，而我们已经知道，这种争夺是社会中主要的反内稳定性的因素。因此，丝毫不必奇怪，遭受这种破坏势力影响较大的社会比起较小的社会来，可以共同使用的信息反而少得多。至于构成所有社会的个人的内部通信组织（神经系），那就比社会好多了。国家就像狼群一样（虽然我们希望不至于如此），它比它的大多数成员更为愚蠢。

上述的意见同大企业领导人、大实验室负责人等等所鼓吹的那种见解相反，他们认为，因为社会比个人大，所以比个人有理智。主张这种见解的人一部分只是由于像小孩子一样的喜欢大、喜欢铺张的心情，一部分是由于有人以为大的组织可能好一些。但是，其中不少人不过是着眼在寻找获利的机会和满足贪欲。

另外有一群人对现代社会的无政府状态不满，他们有一种总以为能想出办法的乐观心情，这使他们过高地估计了社会中可能有的内稳定因素。纵然我们对这些人会表示同情，我们了解他们在情绪上处在进退维谷的境地，但是我们不能给这种如意算盘以太高的估价。这种想法就像老鼠想给猫挂上铃铛一般。无疑的，对于我们这些老鼠说，给这个世界上的掠夺性的猫都挂上铃铛是极可喜的，但是谁去挂呢？谁给我们保证无情的权力不会回到那些最贪图权力的人的手中去呢？

我提起这一点，因为我有些朋友非常希望这本书里可能包含的新思想会发生某种社会效用，我认为这是虚假的希望。他们确信人们对物质环境的控制已远远超出人们对社会环境的控制和理解。因此，他们认为当前的主要任务是把自然科学中的方法推广到人类学、社会学、经济学方面去，希望能在社会领域里取得同样程度的胜利。他们起初相信这样做是必要的，进而相信这样做是可能的。在这点上，我认为他们表示了过分的乐观，并且误解了一切科学成就的性质。

一门精密科学的所有巨大成功都是在这样的一些领域里得到的，在那里，可以把观察者与现象高度地分离开来。我们在天文学中见到，这种分离是由于某些现象比起人来太巨大了，因此即使人费尽力气，也不能对天体世界发生丝毫影响，更不要说光是看它一眼了。另一方面，在现代原子物理学，即关于无法形容的微小东西的科学中，我们做的任何事情的确对许多个别粒子都起影响，而且这种影响对各个粒子来说是巨大的。但是，无论从空间上或时间上说，我们都不是生活在像粒子那样的标度中。一个观察者按照其生存的标度来看认为可能有巨大意义的事件，在我们看起来只是由大量粒子合作产生的平均集体效应——不错，有些例外，例如在威尔逊云室的实验中。就这些效应来说，其时间间隔对个别粒子及其运动说来是很大的，因此我的统计理论有符合要求的足够基础。总而言之，要去影响星辰的运行，我们太渺小了，要去观察分子、原子和电子，我们又太大了，因而只能观察它们的集体效应。在这两种极端情况下，我们同我们所研究的现象进行相当松弛的耦合，我们只是从这种耦合中得出集体性的总的解释，虽然这种耦合对我们来说还不够松弛到可以完全忽略的程度。

在社会科学中，极难使被观察的现象和观察者之间的耦合减到最低限度。相反，观察者能够对他所关心的现象施展巨大影响。虽然我十分尊敬我的那些人类学家朋友的智慧、本领和诚实目的，但是我并不认为他们所考查的任何社会以后将永远不变。许多教会人士在给原始语言写成文字的过程中，把语言误解成永久的法律。一个民族的社会习惯可以仅仅因为对它进行调查工作而消失或发生变化。在另一种意义上，这就是常说的“翻译者是叛逆者”的意思。

另一方面，社会科学家没有从永恒的、与时间地点无关的角度来冷静观察他的科目的那种便利。也许有一种人类微生物的群众社会学，这门科学观察人类就像观察瓶子里的果蝇一般；但这不是我们这些人类微生物所特别关心的社会学。我们对人类在永恒相

之下(sub specie aeternitatis)的兴亡苦乐很难有动于衷。人类学家所报告的习俗,是那些寿命同他自己一般长的人们的习俗(这些习俗是和那些人的生活、教育、事业和死亡牵连着的)。经济学家最关心的是预测几十年以内产生的或是至少对一个在他事业的各个阶段中起影响的那种商业周期。现在很少有政治哲学家会把他的研究局限在柏拉图的理念世界中。

换句话说,我们在社会科学中不得不考虑一些短期的统计游程,我们也没有把握断定我们见到的大部分东西是不是我们自己创造的赝品。对股票市场的研究很可能把股票市场弄糟。我们不能成为好的研究者,因为我们同我们的研究对象太一鼻孔出气了。总之,不管我们在社会科学中的研究是统计性的或是动力学性质的——这种研究一定具有两可的性质,它们可信的程度只能够到达头几位数字,一句话,它们不能给我们提供大量的可以验证的、有意义的信息,如同我们在自然科学中可以希望得到的那种信息一样。我们不能忽视这些信息,但我们对这些信息的可靠性不要抱着过大的希望。不管我们愿意与否,有许多东西我们只好让熟练的历史学家用不"科学"的、叙述的方法去进行研究。